



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Engenharia Civil

**Diana Rosa da
Silva Bastos** **Avaliação de Casos de Valorização de Resíduos
de Celulose em Materiais de Construção**



**Diana Rosa da
Silva Bastos** **Avaliação de casos de valorização de resíduos de
celulose em materiais de construção**

Dissertação a apresentar à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado do Departamento de Eng^a. Civil da Universidade de Aveiro e com a co-orientação da Doutora Regina Célia Espinosa Modolo, Investigadora doutorada da Universidade Unisinos, campus de São Leopoldo, Brasil.

O júri

Presidente

Professor Doutor, Paulo Barreto Cachim

Professor Associado, Universidade de Aveiro

Doutora Helena Maria da Costa Paiva

Investigadora, CICECO, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira

Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira pelo apoio, disponibilidade e ensinamento.

Um agradecimento especial a Regina Modolo por toda a motivação, disponibilidade, paciência e ensinamento.

Um agradecimento à Eng^a. Maria Carlos e ao Sr. Vítor Rodrigues pela disponibilidade e excelente profissionalismo.

Aos meus colegas e amigos, em especial à Sara Costa e Francisco Loureiro por todo vosso apoio, companheirismo e amizade sincera, durante este percurso.

A minha família, pelo apoio e por sempre acreditarem em mim. E por último e, não menos importante, a ti Marco, por estares sempre ao meu lado, por me fazeres rir nos momentos mais difíceis e acreditar.

Palavras-chave

Resíduos Sólidos, Cinzas de fundo, Materiais de construção civil, Soluções de valorização

Resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação enquadra-se no objetivo geral de valorização de resíduos provenientes de unidades de pasta de papel.

Atualmente, o setor da pasta e do papel ocupa um lugar bastante relevante na nossa economia, e é uma das indústrias que gera maiores quantidades de resíduos. De modo a minimizar o seu impacto ambiental foi necessário investir no desenvolvimento de soluções para a reutilização destes resíduos, evitando assim a sua deposição em aterros.

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo do estado da arte das várias soluções de valorização adotadas para os resíduos, e perceber quais as suas vantagens/desvantagens, e até que ponto existe viabilidade técnica, económica e ambiental para prosseguir com a sua aplicação. Neste trabalho também foi realizado um estudo que visa a incorporação da cinza de fundo na produção de um betão convencional, substituindo-a parcialmente pelos seus agregados.

Neste contexto foram elaboradas formulações de betão com vários teores de cinza de fundo, e realizados ensaios laboratoriais para avaliar o seu comportamento físico e mecânico. Os resultados dos ensaios experimentais comprovaram que é possível a substituição da cinza de fundo pelas matérias primas convencionais usadas na produção de betão. Esta solução de valorização é bastante interessante sob o ponto de vista económico e ambiental, uma vez que permitiria a reutilização quase total deste resíduo.

Keywords

Solid Wastes, Bottom Ash, Material and Civil Construction, Appreciation Solutions

Abstract

The work developed in this thesis aims the waste recovery from paper and pulp industry.

Currently, the pulp and paper sector occupies an important place in our pulp economy and it is one of the industries producing greater amounts of residues. In order to minimize its environmental impact, different strategies have been developed to reuse the residues, preventing their deposition in landfill.

This work aimed to explore the state of the art of different solutions for reuse of industrial waste and to understand their advantages / disadvantages and viability in terms of technical, economical and environmental strategy. The incorporation of bottom ash replacing part of the aggregates in the conventional concrete was studied. In this context, concrete formulations were prepared with various bottom ash contents and evaluation of their physic and mechanical performance carried out. The results showed that bottom ashes can replace the conventional raw materials in the production of concrete. This allows to reuse almost all wastes and, therefore, it becomes an interesting recovery solution from an economic and environmental point of view.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objetivos	1
2.	Indústria da Pasta e do Papel em Portugal	3
2.1.	Produção da Pasta e do Papel e resíduos gerados	3
2.2.	Resíduos estudados	5
2.3.	Resíduos Orgânicos	6
2.3.1.	Lamas Primárias	7
2.3.2.	Lamas Secundárias ou Biológicas.....	7
2.4.	Resíduos Inorgânicos	8
2.4.1.	Dregs e Grits.....	8
2.4.2.	Cinzas de Fundo ou Escórias (Combustão de biomassa)	9
2.4.3.	Cinzas Volantes	11
2.4.4.	Lamas de Carbonato de Cálcio (LCC).....	12
3.	Soluções de Valorização dos Resíduos gerados pela indústria da Produção da Pasta e do Papel.....	13
3.1.	Valorização em materiais da construção.....	13
3.1.1.	Telhas ou chapas de fibrocimento.....	13
3.1.2.	Tijolos para alvenarias com resíduos	14
3.1.3.	Agregados leves	18
3.1.4.	Produção de Betão e outros materiais cimentícios com resíduos.....	21
3.1.5.	Argamassas industriais com resíduos	27
3.1.6.	Pavimentos Rodoviários e Misturas Betuminosas.....	31
3.2.	Valorização na produção de energia	34
3.3.	Valorização em Agricultura e Compostagem.....	39
3.4.	Outras aplicações	43

4.	Estudo de valorização dos resíduos - Caso de estudo	47
4.1.	Desenvolvimento de uma base de dados com uma lista de soluções e valorização dos resíduos da celulose.....	48
4.1.1.	Metodologia.....	48
4.1.2.	Base de dados resíduos - soluções.....	49
4.2.	Caso de Estudo - "Valorização de cinzas de fundo num betão convencional"	58
4.2.1.	Enquadramento	58
4.2.2.	Desenvolvimento experimental.....	59
4.2.3.	Resultados e conclusões	75
5.	Conclusões	89
6.	Referências Bibliográficas	93

Índice de Figuras

Fig. 2.1 - Destino final dos resíduos sólidos produzidos.	5
Fig. 2.2 - Diagrama esquemático do processo geral do tratamento de efluentes. [Thompson et al., (2001)]	6
Fig. 2.3 - Lamas Primárias. [Simão, (2011)].....	7
Fig. 2.4 - Lamas secundárias. [Simão, (2011)].....	8
Fig. 2.5 - Resíduos inorgânicos.....	9
Fig. 2.6 - Cinzas de Fundo de leito fluidizado.....	10
Fig. 2.7 - Cinzas Volantes.	11
Fig. 2.8 - Lamas de Carbonato de Cálcio.	12
Fig. 3.1 - Processo de fabricação dos blocos prensados de encaixe de solo-cimento com adição de <i>grits</i> . [Pinheiro et al., (2013)]	17
Fig. 3.2 - Corpos de prova de agregados leves antes da queima. [Pinto, (2005)]	19
Fig. 3.3 - Agregado leve com incorporação de resíduo. [Pinto.(2005)]	20
Fig. 3.4 - Composição das treze formulações de betão (w/b : rácio de água/ligante (%)). [Barbosa et al., (2013)]	25
Fig. 3.5 - Painéis constituídos por blocos cerâmicos chapiscados e revestidos com argamassa em camada única. [Carvalho, (2006)]	30
Fig. 3.6 - Exemplo de pavimento flexível. [Modolo et al., (2010)].....	33
Fig. 3.7 - Esquema simplificado da evolução contínua dos resíduos orgânicos ao longo da compostagem. [Mustin, 1987, In: Santos (2001), Oliveira, (2009)]	42
Fig. 3.8 - Aspeto de cada um dos resíduos a compostar e mistura final (no centro). [Oliveira, (2009)]	42
Fig. 4.1 - Descrição dos principais tópicos estudados e desenvolvidos durante a construção da base de dados.....	48
Fig. 4.2 - Matérias primas utilizadas nas formulações do betão.	59
Fig. 4.3 - Série de peneiros utilizada em mesa de agitação para análise granulométrica. [Dias, (2012)]	60

Fig. 4.4 - Curvas de distribuição granulométrica dos agregados da mistura de betão.	60
Fig. 4.5 - Massa volúmica da cinza de fundo pelo método do picnómetro.....	61
Fig. 4.6 - Exemplo da curva granulométrica dos agregados que compõem a composição <i>B1_C15</i>	63
Fig. 4.7 - Curvas das mistura granulométrica da 1ª referência.	65
Fig. 4.8 - Curvas de mistura granulométrica da 2ª referência.	66
Fig. 4.9 - Forma e dimensões dos provetes.	68
Fig. 4.10 - Moldagem e compactação dos provetes.	68
Fig. 4.11 - Cone de <i>Abrams</i> com a camada de topo já devidamente compactada, e a superfície de betão rasada.	69
Fig. 4.12 - Ensaio de resistência á compressão.....	70
Fig. 4.13 - Medição direta do provete tal como recebido.	70
Fig. 4.14 - Ensaio de ultrassons com o aparelho PUNDIT.	71
Fig. 4.15 - Ensaio de durabilidade por penetração de cloretos.	73
Fig. 4.16 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	73
Fig. 4.17 - Provetes de betão submersos em água durante pelo menos 72 horas.	74
Fig. 4.18 - Difratoograma de raios X das cinzas de fundo.....	75
Fig. 4.19 - Fenómeno de exsudação do betão.....	78
Fig. 4.20 - Separação das partículas de cinza de fundo retidas no peneiro 1mm.	80
Fig. 4.21 - Tipo de roturas obtidas no ensaio de Resistência Mecânica á Compressão.	82
Fig. 4.22 - Ensaio da Capilaridade, quantidade de água absorvida pelas composições de betão com hi (horas).	84
Fig. 4.23 - Penetração dos cloretos nas composições 1ª referência de betão.....	85
Fig. 4.24 - Penetração dos cloretos nas composições de betão de 2ª referência.	85
Fig. 4.25 - Penetração dos cloretos nas composições de betão de 2ª referência.	86

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Massa volúmica da cinza de fundo pelo método do picnómetro.	61
Tabela 4.2 - Formulações de betão desenvolvidas (razão w/c, com, w - água : c - cimento).	63
Tabela 4.3 - Volume dos componentes do betão em 1m ³	64
Tabela 4.4 - Parâmetros de <i>Faury</i>	64
Tabela 4.5 - Massas volúmicas dos agregados (ρ).	65
Tabela 4.6 - Percentagem dos agregados da mistura <i>Bref1_CO</i> quando comparadas com a curva de referência.	65
Tabela 4.7 - Dosagens corrigidas dos agregados para a composição de 1ª referência.	66
Tabela 4.8 - Dosagens corrigidas dos agregados para a composição de 2ª referência.	67
Tabela 4.9 - Dosagens corrigidas dos agregados para a composição de 2ª referência mas com a fração mais grossa da cinza de fundo (>1mm e >2 mm).	67
Tabela 4.10 - Composição química e mineralógica da cinza de fundo. [Modolo, (2014)]	76
Tabela 4.11 - Valores de <i>Slump</i> para as misturas da 1ª referência.	77
Tabela 4.12 - Valores de <i>Slump</i> para as misturas da 2ª referência.	79
Tabela 4.13 - Valores de <i>Slump</i> para as misturas da 2ª referência com granulometria superior a 1mm e 2mm.	80
Tabela 4.14 - Valores de <i>Slump</i> para as misturas de 1ª referência.	81
Tabela 4.15 - Valores de <i>Slump</i> para as composições de 2ª referência.	81
Tabela 4.16 - valores de <i>Slump</i> para as composições que incorporam a fração mais grossa da cinza de fundo.	81
Tabela 4.17 - Comportamento mecânico dos provetes de betão.	82
Tabela 4.18 - Valores da profundidade média de penetração dos cloretos nas misturas de betão.	84

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Nas últimas décadas tem-se desenvolvido uma maior consciencialização ambiental face ao uso dos recursos naturais do nosso planeta. Atualmente o setor da pasta e do papel ocupa um lugar bastante relevante na nossa economia e, é uma das indústrias que gera maiores quantidades de resíduos. De forma a minimizar o impacto ambiental que esta grande indústria provoca na natureza, foi necessário investir no desenvolvimento de soluções para a reutilização desses resíduos, evitando assim a sua deposição em aterros.

O setor da construção civil pode ser a solução para este paradigma, uma vez que esta necessita de uma grande quantidade de matérias-primas e por isso, tem a capacidade de escoar e valorizar grandes quantidades de resíduos como substituto de muitas das matérias-primas convencionais utilizadas na construção. A racionalização e o uso dos recursos naturais de forma consciente e comprometida com a responsabilidade ambiental é, atualmente, um dos maiores desafios da sociedade. A valorização dos resíduos torna-se então uma alternativa de produção, afetando menos o meio ambiente e permitindo a renovação dos recursos, daí a importância crescente desta área. [Modolo, (2006)]

A valorização de resíduos provenientes da indústria da pasta e do papel no sector da construção é a questão focal desta dissertação. Inicialmente, foi desenvolvida uma pesquisa relativamente aos resíduos gerados provenientes desta indústria e as suas atuais formas de aplicação. São inúmeros os autores que já os investigaram e valorizaram como matérias-primas em vários setores de atividade. Dentro deste contexto foi ainda aprofundada a questão de valorização da cinza de fundo, resíduo gerado pela indústria da pasta e do papel, na produção de um betão convencional substituindo-a parcialmente pelas matérias-primas convencionais que compõem o mesmo. Todo este enquadramento é finalizado tendo em conta a quantidade de cinza de fundo gerada anualmente e qual a melhor forma de a escoar na área da construção, mais precisamente na produção de betão.

1.2. Objetivos

Esta dissertação teve como principal objetivo o estudo da valorização de resíduos gerados pelo setor da pasta e do papel em materiais de construção. Para o efeito foi realizada uma pesquisa

bibliográfica de forma a contribuir para a elaboração de uma base de dados que disponibiliza a informação estudada e desenvolvida por vários autores, tais como, Simão, (2011), Modolo et al., (2008), Shakir et al., (2013) e entre outros, ao longo de vários anos, relativamente á valorização de resíduos provenientes da produção da pasta e do papel no setor da construção, contribuindo assim para as transferências de conhecimento para o meio empresarial.

Neste trabalho foi ainda elaborado um caso de estudo, que pretende a aplicação da cinza de fundo proveniente da queima de biomassa, essencialmente eucalipto, na produção de um betão convencional como matéria-prima no setor da construção civil. Nesse contexto foram desenvolvidas formulações de betão e comparadas com uma de referência (sem cinza de fundo na sua incorporação). Com a elaboração deste estudo foi possível avaliar as propriedades físicas e mecânicas do betão produzido com cinza de fundo e compará-lo com um betão convencional, percebendo se este seria viável para ser aplicado na construção sem diminuir a qualidade das obras onde seria aplicado. Caso se verifique a sua viabilidade esta tornar-se-ia muito rentável e eficaz no escoamento de toneladas de cinza de fundo produzida anualmente, eliminando, pelo menos em boa parte, a quantidade deste resíduo que tem como destino final, os aterros.

2. Indústria da Pasta e do Papel em Portugal

2.1. Produção da Pasta e do Papel e resíduos gerados

A produção da pasta e do papel constitui, atualmente, um setor industrial de grande importância em Portugal, evidenciada pelos rendimentos que este gera no país e no volume de emprego gerado. Num contexto de 5 anos de recessão da economia nacional, o setor da Pasta e do Papel português conseguiu aumentar, em 2013, a produção da pasta que foi diretamente incorporada no processo de produção de papel em 3,8 %, evidenciando assim a crescente integração vertical do setor.

Ao nível da produção de papel, o ano de 2013 ficou marcado por um aumento de 2,7 % nas toneladas de papel produzido face a 2012. O setor continuou a contribuir positivamente para a balança de pagamentos portuguesa, uma vez que as exportações de pasta aumentaram 8,6 % face a 2012, e as exportações de papel cresceram também 3,4 %. [Celpa, (2013)]

Existem vários processos de fabrico de pasta de papel tanto de natureza mecânica como química. Em Portugal a produção da pasta e do papel é produzida apenas por processos de natureza química, sendo as mais usuais a pasta de eucalipto crua ou branqueada a sulfato ou *Kraft*, pasta de eucalipto crua ao sulfito e pasta de pinho crua ao sulfato ou *Kraft*.

Durante os processos de produção, esta indústria produz toneladas de resíduos, que poderiam ser geridos de forma sustentável, com o intuito de minimizar o impacto negativo no meio ambiente. Essa gestão dos resíduos é feita tendo em conta o controlo e tratamento dos efluentes e das emissões, a redução do consumo de água e energia, e a recuperação de papéis usados e respetiva reciclagem. Muitos estudos têm comprovado que há viabilidade económica na deposição desses resíduos em solos agrícolas, ou como solos estabilizadores em aterros, com alguns benefícios para os solos e produtividade florestal, no entanto, também aliados a alguns problemas ambientais. O aumento da produção quer na indústria da celulose, quer na indústria energética, estão a gerar cada vez mais destes resíduos, e em pouco tempo não restaram locais apropriados para os depositar. Torna-se portanto necessário encontrar uma solução alternativa, que seja igualmente económica mas menos agressiva para a natureza, que vise a reutilização dos mesmos.

Em Portugal, a gestão de resíduos é feita com base na norma NP EN ISO 14001, que tem como prioridade ambiental evitar a geração de resíduos, uma vez que estes ao mesmo tempo que produzem lixo contribuem também para uma significativa perda de recursos. Torna-se, portanto, imperativo que seja estabelecido uma hierarquia de destino preferencial para estes resíduos na qual

se seguem à prevenção, a reutilização e a reciclagem, a recuperação energética e, por último, a deposição adequada, normalmente em aterro sanitário. [Machado, (2002); Modolo, (2006); Dias, (2012)]

A deposição dos resíduos em aterro, como destino final, não só implica uma perda de valor potencial dos resíduos depositados como também ocupam grandes áreas. Com a expansão das áreas urbanas torna-se cada vez mais difícil encontrar locais adequados para aterros, uma vez que as populações não estão dispostas a aceitar um aterro perto das suas habitações e, para construir aterros convenientemente localizados e ambientalmente corretos, são necessários grandes investimentos, no sentido de cumprir a regulamentação rígida que visa proteger a saúde pública e o ambiente onde se integram. Tem-se, portanto, que reconhecer os resíduos como recursos e perceber que o resíduo tem valor, tanto em termos económicos como ambientais. [Pinto, (2005)]

A aplicação dos resíduos gerados na indústria da celulose, nos solos agrícolas é, atualmente, outra solução de valorização muito utilizada. O solo, pelas suas características físicas, químicas e biológicas, surge como um potencial meio para albergar os resíduos orgânicos com efeitos benéficos no solo, tais como a elevação do pH com consequente aumento na disponibilidade de determinados nutrientes, nomeadamente fósforo e micronutrientes; aumento da capacidade de troca de catiões dos solos; incorporação de nutrientes minerais necessários às plantas e melhoria das propriedades físicas como a granulometria, a capacidade de retenção de água e a densidade do solo. [Bellote et al., (1998), Simão, (2011)]

Em Portugal, segundo o boletim estatístico (BE) da CELPA "Associação da Indústria Papeleira Portuguesa" publicado em 2013, como destino final dos resíduos sólidos destacam-se a aplicação de lamas e cinzas resultantes da queima de biomassa na agricultura e compostagem, correspondente a 13 % do total de resíduos, a valorização por outras indústrias que representou 16 % e a valorização energética que corresponde a 58 %, e por último a deposição em aterro que corresponde a 13 % dos resíduos sólidos totais gerados (figura 2.1).

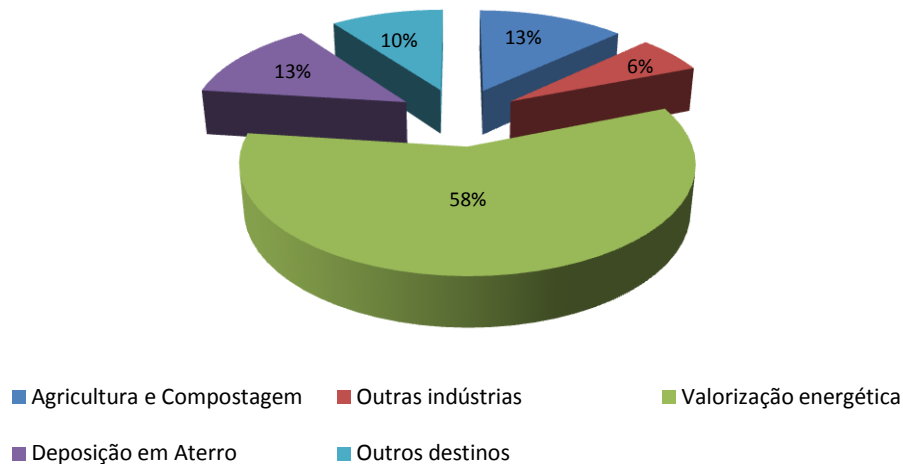


Fig. 2.1 - Destino final dos resíduos sólidos produzidos.

Estes dados levam-nos a refletir e a perceber a importância de uma saída ambientalmente sustentável dos resíduos gerados anualmente em Portugal.

Uma vez que a geração de resíduos deste tipo assume proporções elevadas, vislumbra-se que a indústria da construção civil poderá tratar-se de um excelente meio de escoamento destes resíduos, evidenciando-se nesse sentido o setor das vias e pavimentos rodoviários, devido à sua grande necessidade de recursos naturais. [Modolo, (2006)]

2.2. Resíduos estudados

Os resíduos sólidos gerados pela produção da pasta e do papel dividem-se em dois grandes grupos, os resíduos orgânicos e resíduos inorgânicos. Ambos podem ser gerados em processos de produção diferentes, tais como, a da pasta e do papel, na energia e do tratamento de efluentes.

Todos os processos utilizados no fabrico de pasta envolvem libertação das fibras de celulose da lenhina envolvente, sem as afetar e maximizando o rendimento em fibras úteis, e posterior branqueamento das mesmas, as quais são naturalmente coloridas. Convém que este último processo decorra com um mínimo de degradação e de perdas de rendimento de transformação. [Pinto, (2005)]

Da produção da pasta e do papel surge o processo de caustificação e o processo de queima de biomassa em fornalha de caldeira de leito fluidizado, que geram as lamas de carbonato de cálcio os *dregs*, e os *grits*, e as areias de leito fluidizado. Na fase de produção de energia resultam cinzas volantes, escória e areia, e finalmente temos as lamas primárias e as lamas biológicas ou

secundárias, que surgem na fase do tratamento de efluentes, estas lamas são essencialmente constituídas por fibra.

Neste trabalho foram destacadas as lamas primárias, lamas secundárias, *dregs* e *grits*, cinzas de fundo, cinzas volantes e lamas de carbonato de cálcio. A caracterização e respetiva estratégia de valorização destes resíduos será desenvolvida nos subcapítulos seguintes, através da análise dos estudos científicos efetuados por inúmeros autores relativamente á valorização destes resíduos, principalmente no setor da construção.

2.3. Resíduos Orgânicos

No tratamento de efluentes surgem dois tipos de lamas, as Lamas Primárias, provenientes do tratamento primário e Lamas Secundárias ou Biológicas provenientes do tratamento biológico e é a partir do processo de *Kraft* de fabrico da pasta de eucalipto, que este se processa, funcionando com uma instalação de tratamento primário e outra de tratamento secundário do tipo lamas ativadas. A figura. 2.2 mostra o processo geral do tratamento de efluentes.

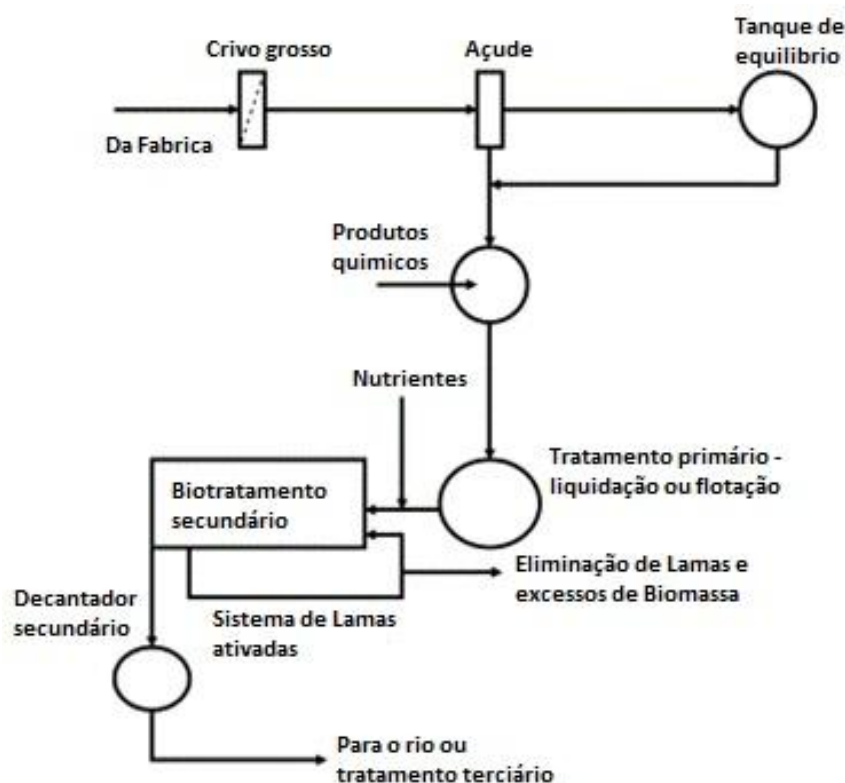


Fig. 2.2 - Diagrama esquemático do processo geral do tratamento de efluentes. [Thompson et al., (2001), Oliveira , (2009)]

2.3.1. Lamas Primárias

As Lamas Primárias são lamas resultantes do tratamento primário de efluentes, este é o processado de forma a separar a matéria sólida, tais como fibras, restos de madeira e etc., que é arrastada no efluente, normalmente através da sedimentação. A remoção de sólidos suspensos (SS) é elevada, superior a 80 %. Thompson, (2001), que sedimentam no fundo do decantador originando as lamas primárias (figura 2.3). [Simão, (2011)]



Fig. 2.3 - Lamas Primárias. [Simão, (2011)]

Os estudos desenvolvidos por vários autores, tais como, Modolo et al., (2011), Pinto (2005), Simão (2011), comprovaram que já é possível a utilização deste resíduo como matéria-prima em materiais na construção. Alguns exemplos de maior êxito são por exemplo, a sua utilização na produção das placas de fibrocimento, ou como substituto dos materiais de enchimento mineral, mais concretamente em betão não-estrutural, na construção de alvenaria e entre outros.

2.3.2. Lamas Secundárias ou Biológicas

As Lamas Secundárias são, também, muitas vezes designadas por Lamas Biológicas, e consistem essencialmente em matéria orgânica separada nos decantadores secundários. Esta lama é difícil de desidratar, sendo espessada em conjunto com a lama primária. [Modolo, (2006)]

O efluente segue depois para um sistema de lamas ativadas, onde é misturado com os microrganismos aeróbios (lama secundária) necessários à oxidação da matéria orgânica nele presente. O fornecimento de oxigénio nestes microrganismos é garantido pelo arejamento da mistura do efluente com a massa de microrganismos existente na ETAR, através do funcionamento de arejadores de superfície. De forma a garantir as melhores condições de tratamento, é adicionado um composto rico em azoto, o que explica o elevado teor de azoto nas lamas secundárias (figura 2.4). [Simão, (2011)]



Fig. 2.4 - Lamas secundárias. [Simão, (2011)]

Em prol da valorização deste resíduo no setor da construção, foram já desenvolvidos vários estudos, Pinto, (2005) e Simão, (2011), que compravam a sua viabilidade técnica. Algumas dessas aplicações passam pela sua incorporação na produção de agregados leves de argila expandida, a sua incorporação na produção de agregados leves e na reciclagem das próprias lamas na sua co-combustão, respetivamente. Muitas são as vantagens da aplicação deste resíduo na construção, quer a nível económico devido a redução de custos, como a nível ambiental devido a redução de emissão de gases nocivos para o meio ambiente.

2.4. Resíduos Inorgânicos

2.4.1. Dregs e Grits

Os *Dregs* e os *Grits* são obtidos durante o processo de causticação, parte do processo de recuperação dos produtos químicos da celulose. Os *dregs* são os compostos não solúveis obtidos do clarificador de licor verde/filtro (licor verde de *dregs*), enquanto os *grits* são materiais insolúveis obtidos depois da reação entre o licor verde e a cal (figura 2.5). [Cabral et al., (2008)]

Os *dregs* são compostos maioritariamente por carbonato, hidróxido ou sulfuretos de sódio, enquanto os *grits* são constituídos basicamente por impurezas, como areias, calcário e outras escórias. Estes resíduos são normalmente encaminhados para aterro como destino final.

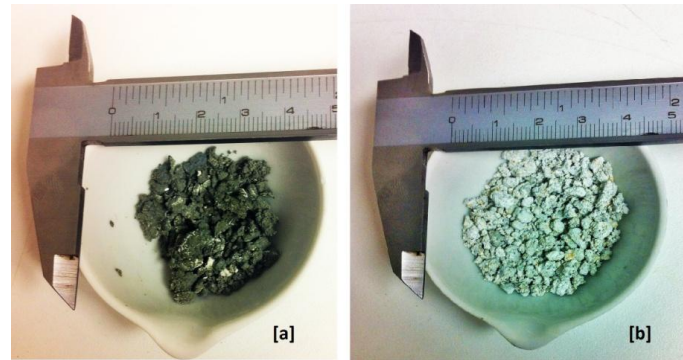


Fig. 2.5 - Resíduos inorgânicos.

[a] *Dregs*; **[b]** *Grits*

Algumas das aplicações mais relevantes dos *grits* no setor da construção civil passam pela sua incorporação nas misturas de betão como substituto parcial dos agregados que o compõem, conferindo uma maior resistência à mistura, Pinto, (2005). Outra forma de valorização para este resíduo é a sua introdução na fabricação de blocos prensados de encaixe de solo-cimento, como um novo material de construção, Pinheiro et al., (2013). Esta solução surge como uma tecnologia viável sob o ponto de vista técnico, económico e sobretudo ambiental, além de minimizar a degradação contínua provocada pelos aterros no meio ambiente, reduz significativamente a exploração de recursos naturais.

Relativamente aos *dregs*, atualmente este resíduo está a ter um maior impacto nas misturas betuminosas para pavimentos rodoviários, cuja produção já se desenvolve a uma escala industrial, Modolo, (2006), ou então tal como as lamas biológicas já é possível a incorporação deste resíduo na produção de agregados leves de argila expandida, Pinto, (2005), no entanto com algumas restrições relativamente a percentagem de incorporação de *dregs* (geralmente baixa).

2.4.2. Cinzas de Fundo ou Escórias (Combustão de biomassa)

Do processo de combustão da biomassa florestal em caldeira de leito fluidizado resultam gases prejudiciais ao meio ambiente, cinzas volantes, cinzas de fundo e energia elétrica. As cinzas de fundo (figura 2.6) são compostas essencialmente por areia, que é o material que compõe o leito, e inertes arrastados com a biomassa que se depositam num tanque de cinzas. A sua gestão é do máximo interesse, tanto a nível económico como a nível ambiental.



Fig. 2.6 - Cinzas de Fundo de leito fluidizado.

As cinzas provenientes da combustão da biomassa apresentam uma forte componente mineralógica na sua constituição, proveniente da própria biomassa ou incorporada durante a combustão da matéria orgânica da mesma. O seu potencial de reutilização é determinado pelas suas propriedades químicas e físicas, e a quantidade e qualidade das cinzas são fortemente influenciadas pelas características da biomassa e pela tecnologia utilizada durante a sua combustão.

O potencial de reutilização dos dois tipos de cinza (volante e fundo) tem sido analisado por alguns autores, Modolo et al., (2012). Por exemplo, a reciclagem das cinzas da biomassa em materiais de construção satisfazem as recomendações da Diretiva Europeia relativamente aos resíduos 2008/98/CE, e têm benefícios significativos para o meio ambiente. A reciclagem das cinzas da biomassa minimizam a extração dos agregados naturais das pedreiras e reduz a quantidade de resíduo que é transportado para aterro. De acordo com este regulamento ambas as cinzas provenientes da biomassa podem ser recicladas em betões, cimento e construção de tijolos e as cinzas volantes podem ser usadas também como um material de enchimento dos taludes de estrada. [Cabrera et al., (2014)]

É imprescindível encontrar formas economicamente viáveis de utilizar estas cinzas, não só pelo facto da sua produção estar a aumentar continuamente, como também o elevado custo, a falta de espaço para a deposição de resíduos e maiores restrições a nível ambiental, mas principalmente devido ao elevado valor em termos de nutrientes e propriedades físicas, que tornam a utilização das cinzas na agricultura, nas florestas ou na indústria de construção uma opção interessante. [Coelho, (2010)]

2.4.3. Cinzas Volantes

Cinzas volantes (figura 2.7) são cinzas de uma textura mais fina arrastadas pelos gases das fornalhas da caldeira. São denominadas como volantes devido ao fato de resultarem do funcionamento do sistema de remoção de poeiras dos gases de exaustão. [Silva et al., (1999); Dias, (2012)]

As cinzas volantes são ricas em óxido de silício e óxido de ferro daí as suas propriedades pozolânicas, devido as suas características químicas ligantes. Por vezes também é registado na sua composição um grande teor de cálcio e nestes casos a cinza volante poderá ser utilizado como um material cimentício. O termo cimentício refere-se às propriedades de auto endurecimento das cinzas, que são muito vantajosas para aplicações na construção civil.

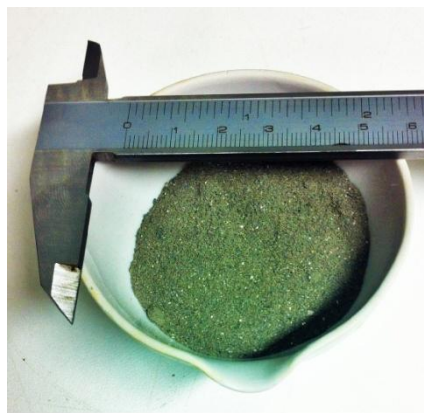


Fig. 2.7 - Cinzas Volantes.

Segundo Ahmaruzzaman, (2010), a cinza volante, apesar de gerar bastante poluição ambiental, trata-se de um resíduo importante com grande potencialidade na substituição de algumas matérias-primas. Este resíduo tem muitas aplicações na construção, na remoção de compostos orgânicos, metais pesados, corantes e até síntese de zeólita que pode ajudar muito para a redução da poluição ambiental.

Este resíduo tem ganho cada vez mais espaço no setor da construção civil. Estudos recentes, Cristelo et al., (2013), Atis et al., (2009), Karahan et al., (2011), e entre outros, estudaram a possibilidade de valorização da cinza volante em aplicações na engenharia, e comprovam que existe viabilidade técnica e económica na sua aplicação em áreas como, o *jet grouting*, materiais cimentícios, incorporação nas misturas de betão, respetivamente, assim como outras aplicações, desde, a construção de pavimentos, na produção de tijolos de resíduos e aplicação em compostagem.

2.4.4. Lamas de Carbonato de Cálcio (LCC)

As lamas de Carbonato de Cálcio (figura 2.8) são um resíduo químico e fisicamente homogêneo, composto, essencialmente, como o próprio nome indica, por carbonato de cálcio. A sua aplicação passa essencialmente pelo setor dos materiais de construção.

É na etapa da caustificação, que resultam as lamas de carbonato de cálcio. O objetivo que preside à recuperação de químicos é transformar o licor verde em licor branco, que ocorre quando a cal é adicionada ao licor verde. Nesta reação conhecida por reação de caustificação resulta o licor branco que é de novo alimentado ao digestor e as lamas de carbonato de cálcio com as quais se volta a produzir a cal. [Oliveira, (2009)]



Fig. 2.8 - Lamas de Carbonato de Cálcio.

Com o intuito de valorizar este resíduo, autores como, Modolo et al., (2013) testaram com êxito a possibilidade da sua utilização como matéria-prima, substituindo-o pelo pó calcário utilizado na fabricação convencional dos agregados leves, e a possibilidade de o aproveitar em argamassas industriais, Carvalho, (2006), ou em pavimentos rodoviários, Dias, (2012), entre outras aplicações na construção civil.

3. Soluções de Valorização dos Resíduos gerados pela indústria da Produção da Pasta e do Papel

Numa sociedade em que o consumo é crescente torna-se cada vez mais importante uma utilização racional dos recursos naturais. Em prol do seu desenvolvimento o Homem é o principal responsável pela esmagadora transformação do nosso planeta, deixando para trás um rasto de degradação do mesmo. Em termos históricos, a atividade antropológica tem alterado significativamente as paisagens naturais de maneira a garantir recursos necessários à sua sobrevivência, deixando uma “pegada ecológica” cada vez mais gravosa, sobretudo temporalmente após a revolução industrial, em que os processos produtivos sendo favorecidos pela tecnologia, necessitam de mais matérias-primas e conseqüentemente, geram uma maior quantidade de resíduos. [Silva, (2009)]

Cabe-nos a nós assegurar o crescimento sustentável da sociedade, tendo consciência que a fonte de recursos é limitada e cada vez mais escassa. Temos que investir na procura de novas alternativas que visem a valorização dos resíduos, que são produzidos cada vez em maior quantidade, em vez do recurso sistemático à exploração dos recursos naturais.

Foi com este foco, numa solução que visasse o escoamento sustentável destes resíduos que inúmeros autores se dedicaram ao estudo dessas mesmas soluções a adotar.

Neste capítulo também se faz referência a algumas soluções de valorização adotadas para as cinzas resultantes da combustão de biomassa para a produção de energia e das cinzas volantes resultantes da combustão do carvão, uma vez que estas apresentam as mesmas características químicas e físicas das cinzas geradas pela indústria papeleira, e que por conseguinte são aplicadas nas mesmas soluções de valorização que as cinzas provenientes da indústria da celulose.

3.1. Valorização em materiais da construção

3.1.1. Telhas ou chapas de fibrocimento

Considerando a grande quantidade gerada de lamas primárias e as suas fibras naturais Modolo et al., (2011) desenvolveram uma solução que valorizasse a incorporação deste resíduo como um material de construção, onde as suas fibras naturais poderiam ser vantajosas. Nesse contexto foram, desenvolvidos estudos preliminares a um nível laboratorial com uma composição base usada nas telhas de fibrocimento. Os resultados mostraram que as lamas primárias poderiam ser incorporadas

na produção das telhas de fibrocimento em baixos teores, sem danificar as características do produto final, com viabilidade técnica na incorporação até 25 %, em peso, de lamas primárias na produção de telhas de fibrocimento. Em termos ambientais esta solução é ótima, pois elimina significativamente a quantidade de resíduo destinado para aterro, e a nível económico verificou-se uma redução significativa dos custos, á volta de 87500 €/ano, quando comparadas com as matérias-primas padrão usadas neste setor. Em relação ao custo de transporte, se este for suportado pelas empresas de placas de fibrocimento, então a sua economia com esta solução será á volta de 76300 €/ano.

3.1.2. Tijolos para alvenarias com resíduos

A construção de paredes de alvenarias com tijolos que incorporam resíduos é uma solução que tem vindo a ganhar cada vez mais peso no setor da construção. Os tijolos convencionais têm sido produzidos com argila e xisto durante décadas. A extração contínua de argila e a remoção de solo superficial para a produção dos mesmos tem vindo a provocar um esgotamento substancial dos recursos virgens. Para além disto, a acumulação de resíduos não geridos têm resultado na escassez de aterros e originado graves problemas de contaminação ambiental. Por esse motivo os engenheiros civis foram obrigados a encontrar uma solução sustentável que salva-se os recursos virgens, evitando o seu esgotamento. [Shakir et al., (2013)].

O estudo deste autor incidiu principalmente na incorporação de cinza volante proveniente da combustão do carvão na produção de tijolos com resíduos a serem aplicados posteriormente em paredes de alvenaria. Ao contrário dos métodos tradicionais de produção de tijolos, esta nova abordagem não usa argila nem xisto, não exige grandes pressões sobre o molde e nem forno de queima com temperaturas elevadas destacando-se um notável ganho ambiental e ecológico. Os resultados em termos de propriedades mecânicas e durabilidade foram recompensadores e promissores. Embora os autores não o refiram seria apropriado também proceder, à realização da caracterização química antes da aplicação dos resíduos. Controlar e verificar a existência de carbono, cloretos e sulfatos contidos nas cinzas volante de forma assegurar o bom desempenho das misturas que as incorporam.

A produção de tijolos com resíduos incorporados com cinzas geradas na combustão da biomassa, também foi uma solução estudada por Zhang, (2013). O seu estudo apresenta o estado de arte de uma revisão de pesquisas sobre utilização de resíduos na produção de tijolos. Este refere que os tijolos são um material de construção largamente utilizado em todo mundo, e que a produção dos

tijolos tradicionais gasta grandes quantidades de energia e larga uma grande emissão de gases de carbono altamente prejudiciais ao meio ambiente. É por isso imperativo a valorização dos resíduos como agregados na produção de tijolos.

Muitas das pesquisas realizadas e estudadas pelo autor, chegam a uma mesma conclusão, que a produção comercial de tijolos com resíduos apresenta ainda muitas limitações, relacionadas com os métodos de fabricação, com a potencial contaminação dos resíduos utilizados, a ausência de normas pertinentes e, a lenta aceitação dos resíduos, como material base na produção de tijolos, por parte das indústrias e do público. Neste trabalho de pesquisa o autor concluiu, que a produção de tijolos com resíduos se trata de uma solução viável, tanto a nível económico como ambiental, permitindo assim um grande escoamento deste resíduo, evitando a sua deposição nos solos como destino final. No entanto este também sublinha a existência de alguns inconvenientes na produção deste produto, tais como, o alto consumo de energia e a alta emissão de carbono na produção dos mesmos, que apesar de ser mais reduzida que na produção dos tijolos convencionais continua a ser ambientalmente preocupante. O autor salienta ainda que para a produção em massa e aplicação dos tijolos com resíduos, é necessário mais pesquisa e desenvolvimento, não apenas os aspetos técnicos, ambientais e económicos, é necessários mais do que isso, uma mudança na política do governo e educação pública com foco na reciclagem dos resíduos e desenvolvimento sustentável.

Outros autores como Siqueira et al., (2013) testaram a viabilidade da reutilização dos *grits*, resíduo proveniente da indústria da celulose, como matéria-prima na produção de tijolos com resíduos de solo-cimento, substituindo-os até 30 %, em peso, pelo cimento *Portland*. Estes autores defendem que a deposição dos *grits* em aterro trata-se de uma solução inadequada. Durante a realização deste estudo, inicialmente, foram elaboradas amostras com resíduo e caracterizadas quimicamente. Depois testaram-se as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos. Uma análise mais detalhada a evolução micro-estrutural das amostras de solo-cimento mostraram que os *grits* são compostos essencialmente por partículas de calcite (CaCO_3). Os resultados indicaram que os *grits* podem ser utilizados de forma económica, segura e sustentável, com uma incorporação até 20 %, em peso, substituindo parcialmente o cimento *Portland* na produção dos tijolos de solo-cimento. Não é recomendável a incorporação de *grits* acima dos 20 %, uma vez que estes provocam o aumento da absorção de água e diminuição da resistência mecânica dos tijolos de solo-cimento. Estes tijolos com resíduos de solo-cimento podem ser aplicados como cerâmica em materiais de construção, muito utilizados, atualmente, nos países em desenvolvimento. Este estudo comprova que o uso de *grits* na produção de tijolos de solo - cimento, para além de reduzir a quantidade de cimento usado na confeção dos mesmos, também traz aliadas vantagens ambientais bastante significativas, uma vez

que a produção dos mesmos, através desta solução não exige a queima a altas temperaturas e, por isso reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa.

Demir et al., (2005) estudaram a viabilidade da produção de tijolos de barro incorporados com resíduos provenientes da produção da celulose pelo método *kraft*, mais propriamente lamas de carbonato de cálcio (LCC) e *grits*. Para esse fim foram realizados ensaios em tijolos de barro com teores de incorporação de cerca de 0 %, 2,5 %, 5 % e 10 %, em peso, de resíduo. Os resultados dos ensaios revelaram a existência de natureza orgânica nos resíduos incorporados, e daí a necessidade de aumentar a capacidade de isolamento do tijolo, através do aumento da porosidade no corpo de argila. Neste contexto verificou-se viabilidade técnica para os teores de incorporação de 2,5 % e 5 %, de resíduo para a formação de poros no corpo de argila, com propriedades mecânicas aceitáveis. Observou-se também que, as fibras naturais das LCC não afetam significativamente o comportamento da mistura até um teor de incorporação de 10 %, uma vez que se aumentar o teor de resíduo incorporado, este provoca o aumento da quantidade de água necessária para a trabalhabilidade. A partir de 10 % de incorporação já é considerado inadequado por causa do aumento da retração por secagem. Este estudo comprova que é viável a incorporação destes resíduos (*grits* e LCC) na fabricação de tijolos de barro, tratando-se de uma solução muito vantajosa sob o ponto de vista técnico e ambiental, uma vez que estes resíduos se comportam como um agente formador de poros, e por isso podem ser utilizados de forma ambientalmente segura, e sem qualquer efeito prejudicial sobre os outros parâmetros de fabricação de tijolos.

A produção de blocos prensados de encaixe de *grits*-solo-cimento foi uma solução de valorização adotada para os *grits* gerados na produção da pasta e do papel, e foi desenvolvido por Pinheiro et al., (2013). O objetivo principal deste trabalho foi a incorporação do teor máximo, aceitável, de *grits* na fabricação deste produto como um novo material de construção para que houvesse uma maior economia do cimento. Este trabalho também pretendia a produção dos blocos a partir de uma prensa manual, realizado por uma pessoa, garantindo uma resistência adequada dos blocos, e nesse contexto verificou-se o teor de humidade ótima. Neste estudo também se realizou uma análise química aos *grits* e dos extratos lixiviados e solubilizados da composição *grits*-solo-cimento com o teor mais adequado, com a finalidade de classificar a mistura quanto aos seus potenciais riscos para o meio ambiente de forma a serem gerenciados adequadamente.



Fig. 3.1 - Processo de fabricação dos blocos prensados de encaixe de solo-cimento com adição de *grits*. [Pinheiro et al., (2013)]

Para o efeito foram realizadas formulações com diferentes teores de solo-*grits*, em massa, tais como 100-0 %, 75-25 %, 50-50 %, 25-75 % e 0-100 %, respetivamente e, foram testados tendo em consideração as exigências normativas. Inicialmente, os autores realizaram uma análise química dos *grits* tendo como base o estado de arte realizado para a realização deste estudo. Neste contexto verificou-se que os *grits* continham vários metais pesados, tais como, níquel (Ni), cádmio (Cd), cobre (Cu), e em maiores quantidades, o magnésio (Mg), zinco (Zn), cálcio (Ca) e sódio (Na). Após a cura dos blocos de *grits*-solo-cimento foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Os resultados mostraram que todos os teores de solo-*grits* cumpriram as exigências normativas, e verificou-se o mesmo relativamente à resistência à compressão e a absorção de água, para os vários teores de resíduo misturado com solo, em que todas as misturas mostraram ter plasticidade suficiente para fabricar os blocos. No entanto, na prática, foi necessário um mínimo de plasticidade da mistura para que fosse possível retirar o bloco da prensa e transporta-lo para o local de cura. Neste contexto foi possível fabricar blocos apenas com os teores 100-0 %, 75-25 % e 50-50 % de solo-*grits*. No entanto, como o objetivo do trabalho era determinar qual a composição que detinha a maior quantidade de resíduo, e que estivesse em conformidade com as exigências normativas, determinou-se que o teor de solo-*grits* que mais se adequa foi de 37,5-62,5 %. Os ensaios de lixiviação realizados nas amostras de solo - cimento com adição de *grits*, correspondente aos teores de 37,5 % e 62,5 %, detetaram metais com maiores teores como o sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e manganês (Mn), e entre outros, correspondente a teores mais baixos. Os resultados do ensaio comprovaram que em termos de toxicidade a composição *grits* - solo - cimento é caracterizada como não tóxica, podendo ser utilizado sem restrição uma vez que todos os teores dos elementos encontrados nos *grits* apresentaram valores inferiores aos máximos permitidos. Relativamente ao ensaio de solubilização, foram encontrados metais como sódio (Na), cálcio (Ca) e cromo (Cr) com maiores teores, e ferro (Fe), zinco (Zn), chumbo (Pb), níquel (Ni) e cobre (Cu), com menores teores. Os resultados deste ensaio permitiram concluir que o extrato solubilizado do solo-

cimento com adição de *grits* não atende aos requisitos aceitáveis definidos na NBR 10005 (ABNT, 2004b) em relação ao padrão de potabilidade da água, uma vez que os teores de Pb, Fe, Na e Cr apresentaram valores superiores aos máximos permitidos. Portanto, esta composição de *grits*-solo-cimento possui constituintes que são solubilizados em concentrações superiores ao permitido.

Perante os resultados obtidos os autores concluíram que a composição de solo-*grits*, respeitante ao teor de 37,5% e 67,5%, em massa, não apresentou características de inflamabilidade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, contudo apresentou constituintes que são solubilizados em concentrações superiores ao permitido. No entanto, esse fato não inviabiliza seu uso para o fim a que se propõe, devendo ser utilizado com as devidas precauções. Sugere-se a utilização de revestimento com pintura para evitar que os elementos solubilizados possam causar possível contaminação da água e/ou trazer consequências à saúde do homem. Este estudo comprovou que é possível o uso dos *grits* na produção de blocos de encaixe de solo-cimento e que esta solução surge como uma alternativa viável em termos ambientais, minimizando a sua degradação provocada pelos aterros e a exploração contínua dos recursos naturais.

3.1.3. Agregados leves

A indústria dos agregados leves pode utilizar uma vasta gama de matérias-primas, que podem ser constituídos tanto por produtos naturais, como minerais ou orgânicos, como madeira, cortiça, casca de arroz, pedra-pomes, escórias e cinzas vulcânicas, perlite, vermiculite, diatomite, etc., ou produtos artificiais como argila expandida, xisto, ardósia, etc. Alguns subprodutos industriais também podem ser aplicados na produção de agregados leves, tais como cinzas volantes, escórias de alto-forno, etc, ou resíduos, como escórias, resíduos da construção civil, lamas, resíduos de vidro, resíduos agrícolas, etc. A produção de agregados leves através do uso de subprodutos industriais apresenta-se como um grande benefício ambiental. [Pinto, (2005)]

Este autor estudou a viabilidade da incorporação das lamas primárias, lamas secundárias, *dregs* e *grits* gerados na indústria da celulose, como alternativa na produção deste material. A metodologia experimental deste estudo desenvolveu-se em quatro etapas, sendo que a primeira consistiu na recolha e caracterização das matérias-primas, a segunda, na incorporação dos resíduos no fabrico de agregados leves, de seguida realizaram-se ensaios industriais e, por último, realizou-se uma caracterização final dos produtos obtidos. Neste contexto foram desenvolvidas formulações com teores variáveis de lamas primárias, cerca de 5 % a 30 %, de lamas secundárias, cerca de 5 % a 40 %, e misturas destas Lamas com 5 % de *dregs*. Os *dregs* e *grits*, apresentaram elevado teor em cal e,

foram incorporados na matriz argilosa para serem aplicados como cobertura dos grânulos a testar, (figura 3.2).



Fig. 3.2 - Corpos de prova de agregados leves antes da queima. [Pinto, (2005)]

[a] Formulações sem cobertura de *grits*; [b] Formulações com cobertura de *grits*.

Tal como se pode verificar, obtiveram-se agregados leves com uma camada de aparência vitrificada com coloração castanha clara, mais esbranquiçada nas formulações com cobertura de *grits*, (figura 3.2) [b]. As formulações com lamas primárias revelaram-se difíceis de misturar, devido à presença de fibras celulósicas. Por isso, não foi possível obter agregados tão homogêneos como os processados com outros resíduos. Na incorporação da matriz argilosa, as lamas foram o resíduo que revelou ser mais adequado, com valores de incorporação entre 10 % e 20 % para as lamas primárias e, no caso das lamas biológicas até 30 % de incorporação. Relativamente à caracterização química dos resíduos da celulose foram detetados metais potencialmente tóxicos mas em quantidades vestigiais, com predomínio do zinco (Zn), cobre (Cu), crómio (Cr) e níquel (Ni), em que os níveis de metais pesados obtidos nos vários resíduos foram sempre inferiores aos valores limite referidos na legislação. Neste estudo também se realizaram ensaios de lixiviação para as formulações que contêm maior teor de incorporação de resíduos e para os agregados produzidos em fábrica com incorporação de 5 % de lamas biológicas. Os resultados obtidos comprovaram que os valores de pH não apresentaram alterações significativas para as várias formulações, e as concentrações de sulfatos e cloretos ficaram abaixo do limite de deteção em todas as amostras analisadas. Também se verificou que a condutividade não apresentou uma tendência para aumentar com o aumento do teor de lamas, o que sugere que não ocorreu lixiviação e, comprovando assim a viabilidade técnica deste processo em termos de eficácia na inertização dos resíduos. Na figura 3.3 apresentou-se o aspeto externo dos corpos de agregados leves com incorporação de diferentes teores de lamas primárias e biológicas.



Fig. 3.3 - Agregado leve com incorporação de resíduo. [Pinto, (2005)]

[a] Agregado leve contendo 10% de lama primária; [b] Agregado leve contendo 30% de lama primária; [c] Agregado leve contendo 10% de lama biológica; [d] Agregado leve contendo 30% de lama biológica.

Verificou-se que a maior parte dos corpos de prova adquiriram uma forma perfeitamente arredondada após o processo de expansão, com a exceção dos agregados que incorporam um elevado teor de lamas primárias, 30 % [b]. Isto ocorre devido à difícil mistura entre as fibras celulósicas das lamas primárias e a argila, as quais ficam muitas vezes à superfície do agregado, não se conseguindo uma boa homogeneização da mistura e que, por conseguinte, resultam na deformação dos agregados após o tratamento térmico. O mesmo aconteceu com um teor mais baixo de incorporação das lamas primárias, que originou um número maior de fendas na camada superficial, comparativamente aos agregados processados com lamas biológicas. Em contrapartida, nas formulações com lamas biológicas, não se verificou o mesmo efeito, uma vez que as lamas se dispersaram de forma homogênea, verificando-se que até uma incorporação de 40 % de lamas biológicas, não ocorreram alterações superficiais evidentes, daí os agregados com incorporação deste resíduo apresentarem uma textura superficial mais lisa do que os agregados contendo lamas primárias [c] e [d]. Os resultados dos ensaios de caracterização destes resíduos revelaram que, a absorção de água diminuiu bastante relativamente as composições experimentais cobertos só com *grits*, podendo ser um indicador de que o material ficou menos poroso, o que leva a crer que os *grits* podem simular o efeito de cobertura da calcite ou dolomite no processo industrial. Relativamente aos ensaios industriais, comprovou-se a viabilidade técnica na incorporação de 10 % das lamas biológicas na produção de agregados leves de argila, não se registando alterações particulares nas características do produto final. Os resultados deste ensaio também comprovaram que não há alterações significativas nas características dos gases de exaustão, após a incorporação das lamas biológicas. Alguns parâmetros mostram até uma tendência a diminuir. Este estudo contribuiu para a implementação efetiva da produção de agregados leves de argila expandida, que incorpora resíduos gerados na produção da pasta e do papel. Esta solução não só reduz os custos inerentes a exploração dos recursos naturais, como também reduz os custos globais com matérias-primas e custos de transporte e de deposição em aterro. Este método de produção apresenta ainda como

vantagem a garantia de inertização dos elementos potencialmente tóxicos contidos nas composições, uma vez que existe a sua reação com a matriz argilosa a alta temperatura.

Outro trabalho Modolo et al., (2013) também testaram a possibilidade da utilização das lamas de carbonato de cálcio (LCC) provenientes da indústria da celulose, como matéria-prima, substituindo-as parcialmente pelo pó calcário utilizado na fabricação convencional dos agregados leves. As LCC são ricas em CaCO_3 , o que as torna interessantes para serem usadas como um agregado mineral a ser aplicado na produção deste produto. O processo industrial foi realizado tendo em consideração algumas limitações nas operações de logística devido a variação do teor de humidade das LCC. Neste estudo também foram estimados os custos associados ao desenvolvimento desta solução de valorização das LCC e avaliada a resistência do produto final. Os resultados obtidos indicam que existe viabilidade técnica da utilização das LCC como matéria-prima na produção de agregados leves, desde que se controle o teor de humidade do resíduo. De acordo com os valores estimados, a utilização desta solução de reciclagem, iria evitar que cerca de 3.000 toneladas de LCC produzidas por ano, fossem depositados em aterro, e ainda aliado a este facto, temos a economia de custos e economia na extração de recursos naturais, que comprova que esta solução de valorização é viável economicamente, gerando vantagens em ambos os lados.

3.1.4. Produção de Betão e outros materiais cimentícios com resíduos

Todos os anos são produzidos mundialmente mais de 1m^3 de betão por pessoa cuja produção do cimento emite cerca de 5 % a 8 % de CO_2 com propensão a aumentar a adição de minerais nas misturas, citando Garcia et al., (2013), os resíduos gerados na combustão da biomassa para a produção de energia como para a produção da pasta e do papel são uma fonte sustentável e renovável e com grande potencial para serem usados como agregados na produção de betão

Tendo em consideração o crescente desenvolvimento na indústria da celulose, Lima, (2010) desenvolveu um estudo que pretende valorizar os *grits*, resíduo gerado na combustão da biomassa, como um agregado de fração mais grossa na produção de um betão, em substituição da rocha natural gnaiss (brita). O gnaiss é uma rocha resultante da deformação de granitos ou de sedimentos de outras rochas, e trata-se de uma das rochas mais antigas do mundo. A sua composição é mineralogicamente diversificada, mais especificamente, mais de 20 % de feldspato potássico, plagioclásio, e ainda quartzo e biotita. Atualmente, esta rocha é amplamente utilizada

como brita na construção civil e pavimentação, além do uso ornamental. [Giacomini et al., (2009), Lima, (2010)].

Neste trabalho, o autor começou por caracterizar os *grits* para avaliar as possíveis aplicações ou restrições à sua utilização, e posteriormente, foram desenvolvidas formulações que incorporam 25 %, 50 %, 75 % e 100 %, em massa, dos *grits* como substituo parcial da brita (gnaisse). Os resultados dos ensaios mostraram que a incorporação dos *grits* na composição de betão provocaram um aumento da resistência à compressão, no entanto, o mesmo não se registou para maiores teores de incorporação, mais propriamente 75 % a 100 %, que provocaram uma redução significativa da resistência à compressão da mistura. A trabalhabilidade da composição de betão foi afetada negativamente com a incorporação dos *grits* na mistura como substituta parcial da brita, a qual foi piorando com o aumento do teor de resíduo incorporado, porém dentro dos limites impostos. Relativamente ao ensaio para determinação da abrasão *Los Angeles*, os resultados obtidos estão acima do limite máximo de perda de massa determinado pela NBR 7211 (1986), concluindo-se assim que o *grits* não atende ao requisito da norma e, por isso, a viabilidade técnica da incorporação do *grits* como agregado de fração mais grossa na produção de betão está restrita a casos onde a resistência a abrasão não seja um fator determinante, mais propriamente, em betões de enchimento e em betões a aplicar em pavimentos que posteriormente serão revestidos. Durante a caracterização do *grits* o autor verificou a existência de soda cáustica residual, e salientou que esta deve ser eliminada através da lavagem do *grits*, de forma a evitar acidentes durante o manuseio do resíduo (queimaduras químicas) e evitar, o excesso de álcalis no betão, que deve ser mantido abaixo de 0,6 % evitando-se desta forma as reações álcali-agregado. O autor refere ainda a necessidade adicional de reutilização da água proveniente do processo de lavagem.

Relativamente às cinzas volantes e lamas primárias geradas na produção da pasta e do papel, Mohammed et al., (2012), testaram a possibilidade de incorporação destes resíduos na produção de um betão. Para o efeito foram desenvolvidas formulações que consideravam as variáveis de relação água/cimento (w/c), teor das lamas primárias e o teor das cinzas volantes. Durante o desenvolvimento deste estudo, foram produzidas 63 misturas de betão que consistiram em 2 séries, cada uma com diferentes variáveis, sendo que a 1ª série, não continha cinza volante na composição de betão e cujos agregados são constituídos por conteúdos residuais (fibras de madeira e uma fração inorgânica - argila, carbonato de cálcio, dióxido de titânio, e outros materiais usados na produção de pasta e do papel) recolhidos durante a separação dos sólidos no primeiro tratamento dos efluentes, por outro lado a 2ª série foi desenvolvida com diferentes teores de cinza volante como substituto do cimento, e foi utilizada uma dosagem de 0,4 % de super plastificante para

melhorar a trabalhabilidade da mistura. As misturas de betão referentes a esta série também continham lamas primárias. Os resultados obtidos tiveram como base modelos estatísticos rigorosos, que serviram para modelar o *slump* e a resistência á compressão aos 28 e 90 dias do betão com resíduos, tendo como variáveis a relação w/c, os conteúdos residuais provenientes do primeiro tratamento e a cinza volante. Relativamente a durabilidade foram realizados ensaios de penetração dos cloretos, ensaios de permeabilidade e ensaios de absorção superficial. Verificou-se que, quanto maior foi a relação entre w/c, maior foi a trabalhabilidade e menor a resistência á compressão. Os resultados dos ensaios comprovaram que ocorreu uma diminuição da trabalhabilidade e da resistência á compressão das misturas, com o aumento do teor de resíduo incorporado na composição de betão. A trabalhabilidade do betão é diretamente afetada pelo teor de cinza volante e conteúdos residuais. O aumento do teor destas componentes nas misturas, levou a um aumento da necessidade de água na mistura fresca de betão de forma a se alcançar o *slump* aceitável, e conseqüentemente, diminuiu a resistência á compressão aos 28 dias. Esta diminuição da trabalhabilidade provocada pelo aumento do teor de cinza volante na mistura foi muito provavelmente, provocada pela elevada quantidade de carbono existente nas cinzas. Embora os autores não o refiram seria apropriado antes da aplicação dos resíduos proceder, a sua caracterização química. Verificar e controlar a existência de carbono, cloretos e sulfatos contidos nas cinzas volantes de forma assegurar o bom desempenho das misturas que as incorporam.

Relativamente às Lamas de carbonato de cálcio (LCC), geradas na indústria da celulose, Ahmadi et al., (2001) testaram a sua aplicabilidade como um substituto da areia fina em misturas de betão. Neste contexto foram produzidas 4 composições de betão que incorporam 3 %, 5 %, 8 % e 10 %, em peso, de LCC como substituto parcial da areia fina, e posteriormente comparadas com a mistura padrão (sem incorporação de LCC). Para o efeito foram desenvolvidos ensaios para se determinar a resistência á compressão, flexão, absorção de água e densidade. Os resultados revelaram que a incorporação das LCC nas composições de betão provocaram um aumento da densidade da mistura, e uma diminuição da resistência á compressão. Esta redução da resistência á compressão é principalmente devido ao elevado rácio de w/c (água/cimento) na mistura. Contudo, a composição com teor de 5 % de LCC, utilizada como substituta parcial da areia fina, apresentou um valor de resistência á compressão aceitável, de 8 Mpa. Esta composição é viável tecnicamente, para ser usada como material na construção de alvenarias de betão, ou como material de enchimento mineral para a produção de betão não-estrutural a ser aplicado na construção de alvenarias.

Modolo, (2006) desenvolveu um estudo no sentido de valorizar os *grits*, provenientes da indústria da celulose, como substituto do cimento. A metodologia adotada pelo autor inclui fases de caracterização química e mineralógica dos subprodutos e dos materiais da construção civil incorporados, ensaios laboratoriais, e caracterização dos provetes obtidos. A introdução dos *grits* na produção de cimento consistiu na incorporação deste resíduo até 5 %, em peso. Neste trabalho o autor comparou as composições de cimento com incorporação de *grits* tendo em conta a composição dos *grits* em cimento *Portland* comercial tipo I 42.5 R. Os resultados dos ensaios revelaram previsões da concentração de algumas espécies sensíveis no desempenho do cimento, tais como, SO₃, Na₂O e Cl. No entanto, a estimativa aponta para um acréscimo pouco significativo de qualquer uma dessas espécies, pelo menos até teores de incorporação de 5 % de *grits*. Relativamente aos ensaios de resistência mecânica, verificou-se que com uma incorporação até um nível de 5 % não ocorreu uma alteração significativa de resistência mecânica, apesar dos valores serem inferiores aos da amostra sem resíduo. O autor refere ainda que, este nível de incorporação é muito superior às quantidades disponíveis de *grits*, pelo que é perfeitamente realizável a utilização de *grits* como aditivo em cimentos. A expectativa para esta utilização ficou em torno de 1 % de incorporação. Tendo os *grits* a vantagem de serem constituídos essencialmente por CaCO₃ que faz parte da matéria-prima deste produto, esta solução é considerada como uma aplicação com grande potencial de escoamento.

Barbosa et al., (2013) estudaram a viabilidade de utilização das cinzas provenientes da combustão da biomassa para a produção de pasta e do papel, como um substituto do cimento e dos agregados naturais do betão, sem comprometer suas propriedades mecânicas e químicas. As cinzas volantes e cinzas de fundo são geradas a partir da combustão de biomassa portuguesa, mais propriamente, eucalipto. Para este trabalho foram desenvolvidas 13 formulações de betão com diferentes teores de incorporação de uma mistura de cinzas de fundo e cinzas volantes, sendo que uma é de referência (F1) e é composta por cimento, areia, cascalho calcário de 10 mm de diâmetro e água. Para a concretização das restantes formulações foram usados três teores diferentes de substituição do cimento pela cinza volante, mais propriamente, 10 %, em peso, nas formulações de (F2 a F5), 20 %, em peso, nas formulações (F6 a F9) e 30 %, em peso, (F10 a F13). Relativamente à cinza de fundo, foram usadas quatro substituições deste resíduo pelos agregados (areia e cascalho calcário), em que, 0 %, em peso, nas formulações (F2, F6 e F10), 9 % nas formulações (F3, F7 e F11), 18 % (F4, F8 e F12) e 36 % para as formulações (F5, F9 e F13) (figura 3.2).

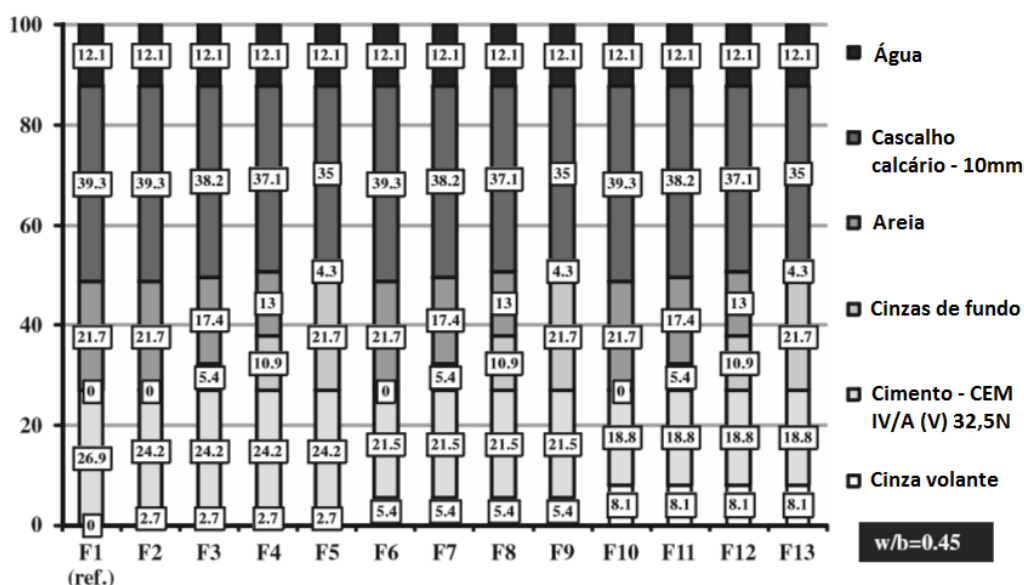


Fig. 3.4 - Composição das treze formulações de betão (w/b : rácio de água/ligante (%)). [Barbosa et al., (2013)]

Estas formulações foram submetidos, posteriormente, a ensaios de resistência mecânica à compressão, depois de 28, 60 e 90 dias de cura, e após os 90 dias de cura foram selecionadas três formulações, uma de referência (F1) e duas novas formulações, com cinzas de biomassa (F2 a F13), para posterior caracterização. Os critérios de seleção das duas novas formulações com cinza de biomassa tiveram em conta as formulações com os melhores valores de resistência á compressão, e entre as formulações com os níveis mais altos de substituição da cinza volante pelo cimento (F10 a F13), as que apresentaram melhores valores de resistência á compressão. Ou seja, para além da composição de referência F1, as formulações selecionadas foram a F4 (com incorporação de 10 % de cinza volante e 18 % de cinza de fundo) e F12 (com incorporação de 30 % de cinza volante e 18 % de cinza de fundo). Após os 90 dias de cura, as formulações F1, F4 e F12 foram submetidas a ensaios de lixiviação de acordo com a norma EN 12457-2, utilizando dois agentes de lixiviação, uma água do mar sintética (meio ASPM - baseado na ISO 10253) e uma água doce sintética (meio ISO 6341, 1996), cujos resultados, relativamente ao ensaio de lixiviação de água doce registaram a existência de alguns componentes químicos, como bicarbonato de sódio (NaHCO_3), cloreto de cálcio (CaCl_2) e entre outros, e relativamente ao ensaio de lixiviação com água marítima, registaram a presença de componentes como cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl), cloreto de magnésio (MgCl_2), e entre outros. Os autores verificaram que, apesar da existência de espécies químicas, estes apresentam-se a um nível de emissão baixo, para ambas as águas de lixiviação, marinha e água doce, e que os níveis de emissão das misturas F4 e F12 são similares, ou ligeiramente mais baixos, do que a composição de referência F1. Relativamente aos resultados dos ensaios de resistência á compressão, o valor obtido para a mistura de referência (F1) foi bastante similar para os 60 dias e 90 dias de cura,

enquanto o valor da resistência das composições selecionadas (F4 e F12) aumentou com o aumento dos dias de cura, e apresentou uma tendência para diminuir com o aumento do teor de cinza volante nas formulações de betão. Em contrapartida, as formulações com incorporação de 10 % de cinza volante como substituta parcial do cimento, respetivamente as formulações (F2, F3, F4 e F5), apresentaram valores de resistência á compressão ligeiramente mais altos do que a formulação de referência, e a formulação com incorporação de 30 % de cinza volante conduziu a um betão com menor resistência á compressão comparativamente a composição de referência. Relativamente as composições F4, F8 e F12, com teor de 18 % de cinza de fundo, verificou-se que estas foram as misturas que apresentaram melhores valores de resistência á compressão.

E por último, Mohammed et al., (2011), também estudaram a possibilidade de incorporação de resíduos provenientes da produção da pasta e do papel nas formulações de betão. Testaram a possibilidade de incorporar cinza volante e lamas primárias, na constituição de um betão. Durante a caracterização química da cinza volante, verificou-se que esta é composta essencialmente por dióxido de sílica (SiO_2), dióxido de alumínio (Al_2O_3), e em menor quantidade, dióxido de ferro (Fe_2O_3), dióxido de cálcio (CaO), dióxido de magnésio (MgO), dióxido de potássio (K_2O), dióxido sulfúrico (SO_2) e dióxido de sódio (Na_2O). Apesar dos autores não o referirem, convém ter em atenção o controle do carbono, cloretos e sulfato contido nas cinzas volantes de forma assegurar o bom desempenho das misturas que as incorporam. Neste trabalho foram produzidas 19 composições de betão, 12 composições (denominadas pela inicial N e S) de betão com cimento *Portland* e incorporado com lamas primárias, e 6 composições incorporadas com cinza volante e um teor muito baixo de lamas primárias (denominadas pelas iniciais FA). Foram realizados ensaios de resistência á compressão, resistência á flexão e resistência á tração aos 3, 7, 28, 60 e 90 dias nas misturas de betão para se determinar as suas propriedades de durabilidade, e realizados ensaios aos 90 dias para avaliar as propriedades mecânicas das misturas. Os resultados dos ensaios revelaram que a incorporação de cinza volante nas formulações de betão como um substituto do cimento *Portland* provocou uma melhoria nas suas propriedades de durabilidade, no entanto também se verificou que à medida que se aumentou o teor de resíduo nas misturas menor foi trabalhabilidade obtida, devido ao alto valor de carbono contido nas cinzas volantes que diminuem o teor em água. Verificou-se também que a resistência á compressão, á tração, tensão retração e resistência á flexão diminuem com o aumento da percentagem de resíduo incorporado (lamas primárias e cinza volante). Os autores concluíram com este estudo que existe viabilidade técnica na incorporação destes resíduos na produção de um betão, no caso das cinzas volantes como um substituto parcial do cimento *Portland*, contribuindo

assim para a redução dos custos da obra, o que atualmente se torna um fator importantíssimo para a indústria da construção.

3.1.5. Argamassas industriais com resíduos

As argamassas são um material de construção muito utilizado atualmente, como um material ligante, mais propriamente, para assentamento em alvenaria, pisos, azulejos, pedras, revestimento e reparos em peças de betão. Este material deve respeitar determinados requisitos de qualidade, apresentando propriedades de consistência e trabalhabilidade no estado plástico e resistência mecânica e aderência no estado endurecido [Petruci, (1978); Alves, (1980), Carvalho (2006)].

Rajamma et al., (2009) testaram a possibilidade das cinzas volantes provenientes da combustão biomassa para a produção da pasta e do papel, serem integradas nas formulações de cimento de argamassas industriais. Durante a realização deste estudo foram produzidas e testadas pastas de cimento e argamassa com substituição parcial das cinzas volantes pelo cimento *Portland*, mais propriamente, em teores de 0 a 30 % de substituição pelo cimento. De acordo com os resultados obtidos, as cinzas volantes são quimicamente semelhantes às cinzas classificadas como classe C, já utilizadas na fabricação deste tipo de produtos, e em conformidade com a norma EN 450. Foram realizados ensaios nas misturas de argamassas que incorporam resíduo na sua constituição, tanto no seu estado fresco como endurecido, e os resultados mostraram que em relação a trabalhabilidade e resistência mecânica, estas apresentaram um comportamento semelhante comparativamente a argamassa padrão (sem incorporação de resíduo). Observou-se que a taxa de hidratação e formação das fases cristalinas depende do conteúdo e da alcalinidade da água. Relativamente a argamassa de cimento com incorporação de cinzas volantes até 10 %, os resultados mostraram que a resistência mecânica mantém-se, no entanto, quando há um aumento do teor das cinzas volantes, até 20 %, a resistência mecânica desce até cerca de 75 % da argamassa de cimento de referência. Verificou-se também que as cinzas volantes contêm níveis significativos de cloreto e sulfato, e por isso sugere-se que para melhorar o desempenho do ligante cinza volante-cimento, haja um controle do teor de cloretos e sulfatos nas cinzas. Este estudo comprova que existe viabilidade técnica na produção de argamassas á base de cimento, com incorporação de cerca de 10 % a 20 % de cinzas volantes, com valores de resistência mecânica semelhantes ao da mistura de referência. Concluiu-se também que para manter e melhorar o desempenho dos ligantes cinza-cimento é necessário eliminar e controlar o carbono, cloretos e o sulfato das cinzas volantes provenientes da biomassa. Esta solução de

reciclagem das cinzas volantes, substituindo-as parcialmente pelo cimento, permite a eliminação significativa da quantidade de resíduo predestinado a aterro.

Modolo, (2006) desenvolveu um estudo no sentido de valorizar o *dregs* e as areias do leito fluidizado, provenientes da produção da pasta e do papel, na produção de argamassas. A metodologia adotada pelo autor inclui fases de caracterização química e mineralógica dos subprodutos e dos materiais da construção civil incorporados, ensaios laboratoriais, e caracterização dos provetes obtidos. Com os resultados da caracterização dos provetes ensaiados avaliou-se o comportamento dos provetes com resíduos incorporados comparativamente aos provetes sem resíduo. A utilização de areias de leito fluidizado na produção de argamassas de maior valor acrescentado foi considerado viável tecnicamente, uma vez que, os valores de índice de espalhamento obtidos ficaram dentro do limite aceitável, mas com uma tendência para diminuir. A areia de leito fluidizado foi aplicada apenas após o seu tratamento, para remoção dos sais solúveis. Este resíduo apresenta uma composição mineralógica constituída essencialmente por quartzo com alguma calcite. Da mesma forma, também se testaram laboratorialmente a possibilidade de incorporar os *dregs* na produção de argamassas, no entanto as amostras que contêm *dregs* apresentaram níveis inaceitáveis para este parâmetro mesmo com baixos níveis de incorporação. A lavagem dos *dregs* não apresentou alteração a este parâmetro. Este comportamento pode estar relacionada com a água contida nos *dregs*, contabilizada para manter a razão água:cimento, mas que parece não ser transferida imediatamente para a mistura o que dificultou a obtenção de uma mistura homogênea e com baixo índice de espalhamento. Relativamente ao início de presa, verificou-se que as areias do leito fluidizado provocaram uma diminuição no início do tempo de presa que pode ser explicada pela presença significativa de cloretos no resíduo, já a incorporação dos *dregs* levou a um aumento do tempo de início de presa, que pode ser explicado pela abundância de finos comparativamente à areia normal, ou pela afinidade química dificultando a reação entre água, ligante e agregado, mas também pode ter sido provocado pelos sais (sulfatos) presentes nos *dregs*. Os sulfatos quando em quantidades superiores às indicadas, retardam a presa, enquanto os cloretos, podem acelerar este processo. Modolo, (2006). Relativamente à resistência mecânica, as argamassas com areias de leito fluidizado apresentaram valores de resistência mecânica muito próximos dos valores observados para a referência e em alguns casos até superiores, enquanto nas argamassas com *dregs* registou-se uma diminuição das resistências mecânicas, principalmente nas amostras com 10 % de incorporação. Isto pode resultar do facto do resíduo, quando em contacto com os outros materiais, dificultar a reação da água, areia e com o cimento, devido a presença de substâncias estranhas, ou ainda, desajuste granulométrico.

Modolo et al., (2012) testaram a possibilidade de incorporação nas argamassas indústrias, as cinzas de fundo geradas a partir da combustão da casca de eucalipto na indústria da celulose. Esta solução apresenta viabilidade técnica mas terá que se recorrer a uma operação de pré-tratamento das cinzas de fundo para remoção dos sais solúveis antes da sua aplicação. O processo de lavagem das cinzas de fundo mostrou-se eficaz (em cerca de 60 % de redução do teor de cloretos). Os resultados dos ensaios realizados mostraram que a trabalhabilidade e a resistência mecânica da argamassa com cinzas de fundo tende a diminuir com a incorporação do resíduo, no entanto poderá ser controlada e mantida dentro do intervalo de valores adequado para as argamassas convencionais. Esta solução deve ser testada e devem-se realizar mais ensaios de longa duração no futuro para comprovar a sustentabilidade da solução proposta.

Modolo et al., (2013) também desenvolveram um estudo que envolve a caracterização das cinzas de fundo considerando a sua distribuição granulométrica, composição química e mineralógica, com o objetivo de as substituir pelas areias convencionais utilizadas nas argamassas industriais. Os resultados mostraram que estas apresentam algumas limitações em relação a sua composição química devido ao elevado teor em sais. No entanto este problema pode ser facilmente ultrapassado, desde que seja devidamente tratado através de lavagem e crivagem antes da sua aplicação. De acordo com os resultados obtidos foi possível concluir que o uso destas cinzas como matéria-prima na produção de argamassas industriais é tecnicamente viável, uma vez que estas apresentam uma distribuição granulométrica bastante adequada, e apenas os cloretos serão alvo de controlo e possível tratamento. Foi possível reduzir cerca de 60 % dos cloretos solúveis presentes na cinza de fundo, através do processo de lavagem simples. Para validar a alternativa de reciclagem das cinzas de fundo, devem-se realizar no futuro, outros ensaios produzidos sob condições otimizadas, com perspectivas de se encontrar uma solução interessante sob o ponto de vista ambiental, evitando assim a sua deposição em aterro.

Outro autor que estudou esta solução foi Carvalho, (2006). Testou a possibilidade de reciclar as lamas de carbonato de cálcio (LCC), provenientes da indústria da celulose, na produção de argamassas para serem aplicadas como revestimento final em paredes constituídas por blocos cerâmicos. A partir da caracterização química das LCC, e tal como o nome indica, verificou-se que esta apresenta um elevadíssimo teor de dióxido de cálcio (CaO) > 99 %, revelando o elevado grau de pureza do resíduo. Relativamente à presença de sais solúveis nas LCC, o autor orientou-se pela literatura, e para este resíduo não foi detetado a presença significativa de qualquer componente, assim como também verificou a ausência de impurezas orgânicas. Neste trabalho foram elaboradas

onze formulações de argamassa, uma de referência, uma argamassa simples (cimento, areia e água), cinco formulações com incorporação de LCC em vários teores, mais propriamente, 0 %, 20 %, 40 %, 80 % e 100 %, e outras cinco com incorporação de cal hidratada, em teores de, 0 %, 20 %, 40 %, 80 % e 100 %. As argamassas produzidas foram posteriormente utilizadas como revestimento final (argamassas de assentamento) em blocos cerâmicos construídos com pelo menos 30 dias de antecedência em relação à aplicação dos revestimentos das argamassas (figura. 3.5).



Fig. 3.5 - Painéis constituídos por blocos cerâmicos chapiscados e revestidos com argamassa em camada única. [Carvalho, (2006)]

A figura 3.5 mostra o detalhe da estrutura de aplicação das argamassas sobre o substrato que foi adotado neste trabalho. As argamassas foram aplicadas numa camada única, cada uma com dimensões 90 x 70 cm e espessura de 2,5 cm, e ficaram em processo de cura durante 28 dias, à temperatura ambiente. Para as argamassas com teores de 80 % e 100 % de LCC verificou-se que estas estão mais suscetíveis as reações de ataque por iões sulfatos, embora, o caráter alcalino devido a presença de carbonato de cálcio no resíduo e a temperatura ambiente local (média de 27°C) desfavoreçam as mesmas. Relativamente à consistência das argamassas verificou-se que todas as argamassas com diferentes teores de adição de LCC obtiveram valores superiores comparativamente as argamassas de cal hidratada, permitindo assim a sua aplicação como revestimento final, mesmo para os maiores teores de adição. Isto pode estar relacionado com a granulometria das LCC (diâmetros compreendidos entre 0,08 mm e 0,04 mm), que por se tratar de um material mais fino pode ter favorecido a diminuição dos espaços vazios e os espaços ocupados pela água de amassadura das argamassas, aumentando assim a consistência das argamassas com LCC comparativamente às argamassas com adição de cal hidratada. O autor também realizou ensaios de retenção de água, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade, e verificou que houve uma grande similaridade nos valores obtidos para ambas as argamassas, com adição de LCC e argamassas com cal hidratada. Relativamente aos ensaios de resistência á tração, os

resultados dos ensaios comprovaram que não houve uma redução na resistência em nenhuma composição de argamassa com adição das LCC, no entanto, registou-se os maiores valores de resistência para as argamassas com cal hidratada, mais propriamente para os teores de 40 % e 100 %, cujos valores de resistência ficaram acima da resistência da argamassa de referência. Sob o ponto de vista ambiental, o autor realizou ensaios de lixiviação e solubilização, e verificou que as LCC se tratam de um resíduo inerte, uma vez que no ensaio de solubilizado se detetou a presença de fluoreto com teores acima do estabelecido pela norma NBR 10006/04, e embora não seja classificado como resíduo perigoso recomenda-se a utilização de equipamentos de segurança adequados, durante o seu manuseio. Em termos económicos, a argamassa com adição de 20 % e 40 % de LCC foram consideradas as mais viáveis quando comparadas com a argamassa que incorpora cal hidratada, em proporções semelhantes. Isto é justificado pelo facto de as argamassas contendo adição de 20 % e 40 % de LCC terem um custo inferior ao custo da argamassa de referência, devido ao menor preço unitário do resíduo em comparação ao preço unitário do cimento. Portanto, a incorporação deste resíduo como adição em argamassa simples para o setor da construção, representa uma alternativa de reutilização do mesmo, uma vez que se comprovou existir tanto viabilidade técnica como económica.

3.1.6. Pavimentos Rodoviários e Misturas Betuminosas

As vias de comunicação e, em particular, a rede rodoviária constituem a infra- estrutura fundamental para o desenvolvimento global de qualquer país. Durante muitas décadas a rede rodoviária portuguesa constituiu um fator de estrangulamento do desenvolvimento do país, apesar da sua relativamente grande extensão, tendo em conta as suas modestas características geométricas e uma quase generalizada deficiente qualidade. [Pereira & Picado- Santos, (2002); Modolo, (2006)]

Dias, (2012) desenvolveu um trabalho que visa a possibilidade de valorizar os resíduos sólidos industriais como agregados para a pavimentação rodoviária. Desta forma evitar-se-iam que toneladas de resíduo seguissem para deposição em aterro e ao mesmo tempo minimizava-se a exploração de recursos naturais não renováveis. Os resíduos estudados neste estudo foram escórias, cinzas de fundo (denominadas também por areias de leito fluidizado – ALF) e lamas de carbonato de cálcio (LCC) resultantes do processo de produção de pasta de papel. O trabalho experimental consistiu na caracterização física, química e geométrica dos resíduos e das matérias-primas tradicionais, e elaboração de testes nas formulações de misturas betuminosas segundo a metodologia *Marshall* com e sem incorporação dos resíduos. As escórias e ALF foram incorporadas

nas misturas betuminosas substituindo parcialmente o pó-de-pedra, no caso das LCC estas substituíram total e parcialmente o *filler* calcário. Os resultados dos ensaios revelaram que a incorporação dos resíduos estudados nas misturas betuminosas apresentaram um elevado potencial de aplicação, uma vez que em relação a parâmetros estudados como estabilidade, deformação, porosidade, entre outros, estas apresentaram bons resultados e por vezes até melhores que a mistura de padrão, sem incorporação de qualquer resíduo. No entanto, registou-se uma exceção, relativamente a substituição de 100 % das LCC pelo *filler* uma vez que a mistura evidenciou total inaplicabilidade devido á sua elevada desagregação. Neste estudo o autor verificou que a incorporação conjugada com outros resíduos, conferem as misturas betuminosas um comportamento que esteve quase sempre em conformidade com os comportamentos verificados para as misturas onde a incorporação de resíduos foi efetuada de forma individual. As melhores misturas com resíduos conjugados foram as misturas com incorporação de 10 % de escórias e 10 % de ALF simultaneamente e com 1 % e 3 % de LCC, obtendo-se um melhor comportamento do que na própria mistura de referência. Refere-se ainda que a mistura que incorpora os três resíduos e onde a totalidade de *filler* é substituído por LCC (5 %) se revelou como inaplicável, uma vez que a mesma apresentou elevada desagregação. Esta solução tem como desvantagem o dispêndio de energia adicional no transporte e tratamentos (secagem das LCC) adicionais destes resíduos, muitas vezes suscetíveis de elevar o custo de valorização dos resíduos, tornando este investimento mais dispendioso do que a exploração de agregados naturais.

Neste contexto Modolo et al., (2010), fizeram um estudo científico com vista na possibilidade de utilização dos *dregs* e dos *grits* como agregados nas misturas de betão a serem aplicados posteriormente nas camadas asfálticas de regularização dos pavimentos de estradas (figura 3.6). Desta forma evitar-se-iam que uma quantidade significativa de resíduo seguisse para aterro como destino final.

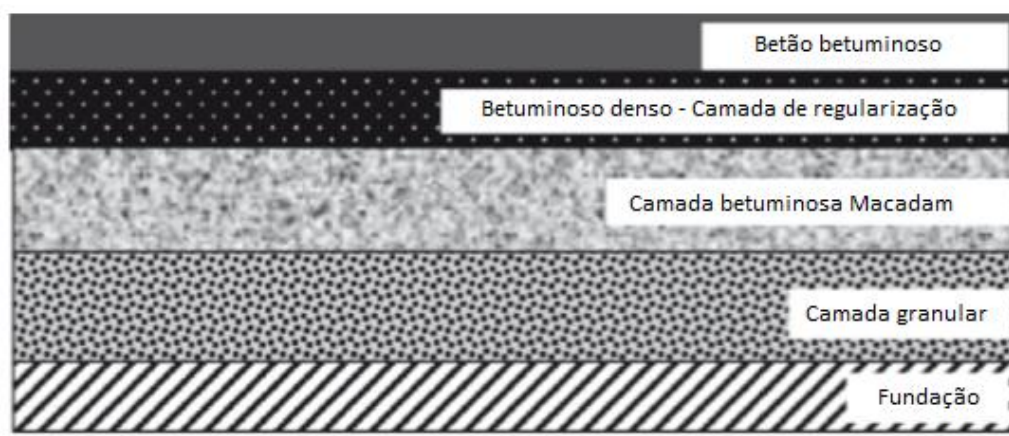


Fig. 3.6 - Exemplo de pavimento flexível. [Modolo et al., (2010)]

Tal como se pode verificar na figura 3.6 as duas camadas de topo do pavimento envolveram agregados e betume. Neste contexto, realizaram-se testes experimentais na segunda camada de topo, camada de betuminoso denso, tendo em consideração as especificações definidas pela autoridade Portuguesa de estradas. Os autores optaram por esta camada porque esta exclui o acesso a agentes ambientais externos e, apresenta condições específicas de flexibilidade para agregados específicos. Neste contexto realizaram-se ensaios de caracterização física e química dos resíduos e testaram-se os agregados específicos para incorporar nesta camada de mistura betuminosa. Em todo os estágios do trabalho foram preparados a uma escala laboratorial espécimes pelo ensaio *Marshal* em conformidade com a norma EN 12697. Este método foi aplicado em toda a camada betuminosa densa com a dimensão nominal máxima de cerca de 25 mm. De acordo com os resultados dos ensaios realizados, é possível verificar que os *grits* podem ser diretamente aplicados como um agregado no setor de construção de pavimentos. De facto, as misturas com *grits* revelam propriedades aceitáveis e estarem preparadas para serem testadas a uma escala industrial. Os *grits* são compatíveis com a pedra britada atualmente usada como agregado nos pavimentos de estrada. Relativamente aos *dregs*, registou-se a presença de sais solúveis e por isso não podem ser aplicados diretamente tendo, de ser tratados primeiro. Depois do processo de lavagem os *dregs* misturados apresentaram valores compatíveis com as misturas de referência. A eficiência do processo de lavagem foi demonstrado baseado nos resultados da condutividade, sais solúveis e testes de azul metileno. A indústria de construção de pavimentos rodoviários permite a incorporação deste resíduo, evitando que toneladas deste material siga para aterro.

Modolo, (2006) desenvolveu um estudo no sentido de valorizar os resíduos provenientes da pasta *kraft* de eucalipto, nomeadamente *dregs*, *grits* e areias do leite fluidizado. Para isso avaliou a possibilidade de os integrar na produção de misturas betuminosas a aplicar em pavimentos

rodoviários. A metodologia adotada pelo autor inclui fases de caracterização química e mineralógica dos materiais da construção civil incorporados, ensaios laboratoriais, e caracterização dos provetes obtidos. Com os resultados da caracterização dos provetes ensaiados avaliou-se o comportamento dos provetes com resíduos incorporados comparativamente aos provetes sem resíduo. O *grits* é um resíduo que apresenta boas características para ser utilizado na área de vias e pavimentos rodoviários, incorporados em misturas betuminosas para camada de regularização. Da mesma forma também se testaram laboratorialmente os *dregs*, para serem aplicados em vias e pavimentos rodoviários, e foi comprovada a sua elevada potencialidade. A partir dos resultados dos ensaios o autor concluiu que os *grits* são o resíduo mais adequado para a produção de misturas betuminosas para a construção de pavimentos e vias, pois possuem uma distribuição granulométrica mais enquadrável nos limites pretendidos como agregado, em substituição do pó-de-pedra calcária. Estes também provocaram uma melhor trabalhabilidade da mistura, o que garante um bom empacotamento e, conseqüentemente, maior resistência do produto. Relativamente aos *dregs*, talvez por se tratarem de um resíduo mais fino, este material enquadrou-se melhor nas especificações dimensionais do *filler* para misturas betuminosas, e só verificaram resultados aceitáveis para teores de incorporação até 5 % de *dregs*.

Modolo et al., (2012) testaram a possibilidade das cinzas de fundo, geradas na produção da pasta e do papel, como agregado para as misturas betuminosas. Os autores concluíram que os teores de incorporação de 10 %, em peso, de cinza de fundos são os que apresentam maior estabilidade. O monitoramento anual das cinzas confirma a variação, relativamente alta, de alguns elementos químicos. Na tentativa de reutilizar os resíduos em novas aplicações é necessário controlar alguns elementos químicos como o cálcio (Ca), o sódio (Na) e o potássio (K), de modo a evitar a sua potencial aglomeração. Esta solução terá que recorrer também a uma operação de pré-tratamento das cinzas de fundo para remoção dos sais solúveis antes da sua aplicação. O processo de lavagem das cinzas de fundo mostrou-se eficaz (em cerca de 60 % de redução do teor de cloretos). Os autores recomendam o ajuste destas formulações de argamassas em estudos futuros, uma vez que os resultados dos ensaios realizados nas misturas não foram os mais desejados.

3.2. Valorização na produção de energia

A produção de energia a partir da co-combustão da biomassa tornou-se uma das melhores alternativas ao combustível fóssil. O aquecimento global provocado pela combustão do combustível fóssil tem motivado o uso da biomassa como material alternativo. A perspectiva de esgotar os

recursos naturais de combustível fóssil e prejudicar o meio ambiente tem encorajado o desenvolvimento de novas alternativas a esses combustíveis (carvão, turfa, petróleo e gás natural). Esta solução está aliada a vantagens muito significativas em termos ambientais, não só minimiza a extração contínua de recursos naturais das pedreiras como também reduz a quantidade de resíduo que é transportado para aterro. [Cabrera et al., (2014)]

Jackson et al., (2009) estudaram a potencialidade das cinzas provenientes da combustão da biomassa na produção de energia. Recentemente foi desenvolvida uma aplicação inovadora que visa a reciclagem de ambas as cinzas, de fundo e volantes, provenientes de duas novas caldeiras de leito fluidizado, e utilizadas como um estabilizador para solo arenoso local e a serem aplicadas como materiais base para pavimentos. Os resultados dos testes laboratoriais e aplicações de campo no norte da Florida ilustraram o quanto este bio-produto é vantajoso na construção de pavimentos e estradas, e ambos ensaios revelaram que a cinza hidratada apresenta uma rigidez igual ou melhor que a pedra cal, que é o material tradicional base de construção de pavimentos na Florida, quando aplicados em ambas soluções de, estabilização do subleito e aplicação na camada de base.

Considerando ainda as cinzas provenientes da combustão do carvão na produção de energia temos Ahmaruzzaman, (2010) estudou a potencialidade da aplicação das cinzas volantes no setor da construção civil. As cinzas volantes são um bio-produto industrial reconhecido como sendo um forte poluente ambiental, no entanto, vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de se encontrar uma solução sustentável e viável adotar para este resíduo. Durante o seu trabalho, Ahmaruzzaman, (2010), estudou várias soluções para a cinza volante no setor da construção, tais como, usar a cinza como um absorvente *low-cost* para remover os componentes orgânicos ou usa-la como um gás de combustão e metais, ou como um agregado leve, ou como um material de enchimento ou até ser usada nas camadas de sub-base das estradas, etc. Têm vindo a ser desenvolvidos, uma considerável quantidade de estudos científicos, no sentido de valorizar as cinzas volantes na construção de estradas, em que os projetos periféricos têm vindo a ser uma porta de saída significativa para as cinzas. Estas têm ganho um papel cada vez mais importante na estabilização de solos de aterro, como um material base no subleito, como um material *filler* ou como um aditivo para pavimentos betuminosos. O uso da cinza de fundo na estabilização dos solos de aterro ao longo das estradas tem sido uma prática benéfica por muitas razões. O autor também refere, a elevada potencialidade da cinza volante, em áreas em que o material utilizado para enchimento escasseia, e esta pode ser uma alternativa eficaz e económica, uma vez que a cinza existe com abundância nas instalações de geração de energia elétrica nas proximidades das obras em questão. Por ser um material facilmente

disponível aliado as suas propriedades físicas positivas, fazem das cinzas um material de solo estabilizador com grande potencial e associado a um custo eficaz. Apesar do autor não o referir, convém ter em atenção o controle do carbono, cloretos e sulfato contido nas cinzas volantes de forma assegurar o bom desempenho do produto final.

Outros autores Atis et al., (2009), realizaram um estudo que comprova a viabilidade técnica na incorporação de cinzas volantes provenientes da combustão de biomassa na produção de energia como substituto do cimento em betões reforçados com fibras de aço. Neste estudo foram produzidas composições com teores de 0 %, 15 % e 30 %, em massa, de cinzas volantes, e composições com teores de 0 %, 0,25 %, 0,5 %, 1,0 % e 1,5 %, em volume, de fibras de aço. A caracterização química da cinza volante permitiu verificar que, esta é constituída maioritariamente por dióxido de sílica (SiO_2), dióxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de ferro (Fe_2O_3) e, em menor quantidade, dióxido de cálcio (CaO), dióxido de magnésio (MgO), dióxido de potássio (K_2O) e dióxido de sódio (Na_2O). Neste trabalho também foram realizados ensaios de resistência á compressão no betão com, 7, 28, 90 e 365 dias. Verificou-se que a presença de fibras de aço no betão não compromete a sua resistência registando-se, uma ligeira melhoria em algumas composições comparativamente á mistura padrão, no entanto, não se verifica o mesmo para as cinzas volantes, ao qual se registou uma perda de resistência com a incorporação da mesma na composição de betão. Em contrapartida, após os 365 dias, a reação pozolânica das cinzas e as fibras de aço incorporadas compensam esta perda registando-se melhorias na resistência á compressão das misturas. Relativamente a trabalhabilidade registou-se uma melhoria com a incorporação da cinza volante na composição de betão reforçado com fibras de aço quando comparado com a composição de referência. Os resultados comprovaram ainda que, a adição de fibras de aço e cinzas volantes no betão provocaram melhorias nas propriedades na resistência à tração, na resistência de retração, assim como nas propriedades de congelamento e descongelamento das fibras de aço no betão. Neste contexto, também se verificou que, o comportamento do betão com cinzas volantes como substituto do cimento é semelhante ao comportamento de um betão de cimento *Portland* com adição de cinzas volantes.

Karahan et al., (2011) também desenvolveram um betão constituído por fibras de polipropileno e as mesmas cinzas volantes, estudadas no trabalho de Atis et al., (2009), referido anteriormente, proveniente da combustão de biomassa na produção de energia. Tal como foi visto anteriormente, as cinzas são compostas maioritariamente por dióxido de sílica (SiO_2), dióxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de ferro (Fe_2O_3) e em menor quantidade, dióxido de cálcio (CaO), dióxido de magnésio

(MgO), dióxido de potássio (K_2O) e dióxido de sódio (Na_2O). Neste estudo foram elaboradas composições com teores de cinzas volantes de 0 %, 15 % e 30 %, em massa, e de fibras de polipropileno de 0 %, 0,05 %, 0,10 % e 0,20 %, em volume. Os resultados dos ensaios realizados laboratorialmente mostraram que, a incorporação de cinzas volantes na mistura de betão levaram a uma melhoria na trabalhabilidade da mesma, no entanto, o mesmo não se verificou para a adição de fibra de polipropileno, tanto em betão de cimento como em betão de cinzas volantes, em que não se registou nenhuma melhoria da resistência à compressão e do módulo de elasticidade da mistura. Neste contexto, também se registou uma pequena melhoria da resistência ao congelamento /descongelamento do betão com incorporação de cinzas volantes e o mesmo também se verificou para a incorporação de fibra de polipropileno, contudo, quando foi aumentado o teor de cinza volante na mistura, registou-se uma descida da resistência à compressão. Verificou-se também um aumento dos valores de porosidade e da absorção de água, com o aumento da quantidade das cinzas volantes e das fibras de polipropileno para todas as misturas de betão. Os autores verificaram que, a presença de fibra de polipropileno e de cinzas volantes no betão, independentemente de ser em conjunto ou em separado reduzem a retração por secagem do betão, e que a resistência ao congelamento/descongelamento do betão reforçado com fibras aumenta com o aumento do teor das cinzas volantes.

Para Coelho, (2010) a valorização das cinzas da biomassa em materiais cimentícios pode ser visto como uma mais valia em termos de soluções sustentáveis. As cinzas em estudo são provenientes da combustão da biomassa para a produção de energia e, a sua incorporação em materiais de construção valorizam-na enquanto matéria-prima nesse setor reduzindo, os custos associados à sua deposição em aterro e, aliada à economia do cimento usado nas formulações de betão, o que seria muito vantajoso em termos económicos uma vez que o cimento é um dos componentes mais dispendiosos do betão.

Durante a realização deste trabalho o autor incorporou as cinzas em substituição e adição ao cimento na produção de argamassas, com o objetivo de avaliar o seu potencial enquanto material de construção. Para o efeito, as cinzas volantes foram incorporadas em teores de 10 %, 20 % e 30 %, em peso, enquanto as cinzas de fundo foram incorporadas em substituição da areia, nos teores de 20 %, 30 % e 50 %, em peso. Foram realizados ensaios de caracterização química das cinzas, em que os elementos maioritariamente quantificados foram o alumínio (Al), cálcio (Ca), ferro (Fe), fósforo (P), magnésio (Mg), potássio (K), silício (Si) e sódio (Na), e os minoritários foram o arsénio (As), cádmio (Cd), crómio (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn). Apesar do autor não ter realizado ensaios de lixiviação durante a realização deste trabalho, este refere a sua importância. Os ensaios

de lixiviação têm como objetivo determinar os elementos solúveis em água, identifica-los e quantifica-los, de forma a inferir sobre os efeitos adversos e os riscos para os rios ou lagos que podem ocorrer caso os materiais sejam depositados de forma a permitir o contato com água. Neste trabalho também se realizaram ensaios de consistência na argamassa fresca, e ensaios de densidade, resistência mecânica, adsorção de água por capilaridade e por imersão, nos provetes endurecidos aos 28 dias de cura. Os resultados dos ensaios revelaram que existe viabilidade técnica na utilização das cinzas de biomassa em materiais cimentícios, uma vez que, as propriedades da argamassa fresca não ficaram significativamente afetadas com a incorporação. As composições com cinza volante não apresentaram alterações na trabalhabilidade podendo ser mantida a razão água: ligante, no entanto, o mesmo não se verificou relativamente as composições com cinza de fundo, uma vez que, foi necessária a adição de água para manter a trabalhabilidade das mesmas. Relativamente á resistência registou-se um ganho significativo nas composições com maior teor de adição de cinza volante, mas não se registou o mesmo para as composições com substituição pelas cinzas volantes que, apesar de também revelarem boas propriedades registou-se uma pequena descida nos valores de resistência nas composições com maiores teores de resíduo. As cinzas de fundo revelaram um enorme potencial na substituição das areias ao qual foi registado uma melhoria nas propriedades dos provetes. O autor refere que apesar dos resultados positivos verificados na incorporação das cinzas (volantes e fundo), são necessários mais estudos acerca da durabilidade para garantir a qualidade das cinzas em aplicações práticas. Para além destas soluções de valorização o autor também refere que as cinzas da biomassa apresentam boas propriedade físicas e químicas para serem aplicadas nos solos para agricultura ou compostagem, e sugere que esta seria uma boa solução a ser desenvolvida em trabalhos futuros.

Outra aplicação foi desenvolvida por Cristelo et al., (2013), trata-se de integrar as cinzas volantes, provenientes da combustão da biomassa na produção de energia, como um substituto do cimento, na produção de um reboco de injeção a ser aplicado na estabilização de solos, através do *jet-grouting*. Esta medida não só foi viável tecnicamente (uma vez que a cinza volante revelou ser um bom material alternativo ligante), mas também ambientalmente, devido aos altos níveis de CO₂ gerados durante a produção do cimento tradicional. O autor refere que apesar dos problemas ambientais causados pela alcalinidade ativa da cinza volante, é importante salientar que este resíduo se trata de um bio produto industrial, e que por conseguinte, não acrescenta nenhum outro problema ao meio ambiente. Em termos de viabilidade técnica, a vantagem de usar produtos alcalinos no cimento, não favorece apenas o comportamento mecânico, mas também a durabilidade da mistura, que é de especial preocupação quando se tratam de estruturas enterradas como as

colunas de *jet-grouting* (vulnerabilidade química do cimento *Portland* a presença dos sulfatos contidos nos solos). A técnica de *jet-grouting* é usada para se criarem cortinas impermeáveis nos solos arenosos, escavando um buraco nos solos a partir de jatos verticais de água com elevada pressão, uma vez atingida a profundidade pretendida, a água é substituída pela pasta química. A cinza volante em estudo é proveniente de uma central termo elétrica portuguesa, e trata-se de um resíduo de classe F, devido ao seu baixo conteúdo de cálcio. Os resultados dos ensaios de caracterização física e química da cinza revelaram que esta é maioritariamente constituída por sílica e alumínio, e o exame mineralógico DRX comprovaram a presença de quartzo e mulite como principais minerais. Neste trabalho também foram realizados ensaios na composição de reboco de injeção recém misturado, tais como, fluidez, absorção capilar, capacidade de retração e expansão, variação da massa durante o processo de cura e densidade, e ensaios de resistência à compressão aos 28 dias de cura. A partir dos resultados dos ensaios verificou-se que, a composição do reboco de injeção deve ser escolhida cuidadosamente uma vez que a resistência é favorecida pelo aumento da densidade da mesma (que implica um aumento da viscosidade e aumento da coesão do reboco). Para melhorar a fluidez sem comprometer a resistência, é necessário aumentar a razão alcali-cinza do reboco de injeção de forma a se manter a concentração de óxido de sódio (Na_2O). O aumento do custo pode ser atenuado a partir de reboco de injeção mais eficaz, em termos de reologia e resistência, que seja capaz de integrar nas colunas de *jet-grouting* e que use menor volume de reboco para atingir um comportamento estrutural satisfatório. Por outro lado, temos o valor mais baixo obtido para a resistência, correspondente ao melhor resultado de fluidez, que é considerado aceitável para ser aplicado nas colunas de *jet-grouting*, cuja composição deve ser baseado inteiramente nas propriedades reológicas do reboco de injeção. Relativamente à retração e expansão durante o processo de cura, os resultados revelaram que a cinza volante é mais sensível as condições de cura, mais propriamente a humidade, devido à sua alcalinidade ativa, do que o cimento. Relativamente a porosidade da composição, esta aparenta ser menor do que nos rebocos com cimento, o que é uma vantagem em termos de durabilidade em condições tão adversas como em meio de solos. Apesar dos autores não o referirem, convém ter em atenção o controle do carbono, cloretos e sulfato contido nas cinzas volantes de forma assegurar o bom desempenho do produto final que as incorporam.

3.3. Valorização em Agricultura e Compostagem

A utilização das cinzas provenientes da biomassa para produzir energia têm inúmeras aplicações sustentáveis. Recolocar as cinzas nos locais onde a biomassa foi colhida é atualmente das opções praticadas, a mais sustentável e ecológica porque, desta forma os nutrientes retornam aos solos

originais e encerram o ciclo mineral. Relativamente as cinzas que não podem ser recicladas, já existem algumas opções, tais como, a sua utilização como fertilizante para os solos ou como matéria-prima na produção de fertilizantes, esta opção aplica-se às cinzas limpas e ricas em nutrientes, ou podem também ser utilizadas como material de construção ou como componente a incorporar num material de enchimento na construção, esta solução aplica-se as cinzas geradas na combustão da biomassa, ou existe também a possibilidade de as utilizar como um combustível, esta solução é mais indicada para as cinzas ricas em carbono provenientes da gasificação do leito fluidizado. [Pels et al., (2005)]

Simão, (2011) defende também que a aplicação dos resíduos orgânicos, resultantes da indústria de pasta e papel, poderão trazer muitos benefícios para os solos. Os resíduos como as lamas provenientes da indústria da celulose, quando aplicadas nos solos poderão provocar um aumento do pH e consequentemente aumentar a disponibilidade de determinados nutrientes, tais como, o fósforo e micronutrientes. A sua aplicabilidade nos solos aumenta a capacidade de troca de catiões dos solos, e de igual forma poderão incorporar nutrientes minerais necessários aos crescimentos das plantas e, melhorar as propriedades físicas como a granulometria, a densidade e a capacidade de retenção de água do solo. Esta solução é ideal para solos com baixa fertilidade, pois não só ajuda a melhorar a sua fertilidade como também controla o nível de matéria orgânica necessária para o bom comportamento do mesmo. O uso deste resíduo na agricultura tem como vantagens associadas o baixo capital de investimento, a baixa complexidade tecnológica e, a introdução de nutrientes e de matéria orgânica nos solos. Em contrapartida, o uso desta técnica também pode apresentar alguns inconvenientes ambientais e económicos, devido á existência de microrganismos patogénicos e metais pesados que podem estar contidos nas lamas, embora não sejam em quantidades significativas, e associados a este facto temos, ainda os custos de gestão do resíduo que poderá ser elevado considerando a logística do processo de acondicionamento e transporte. Referindo também que, as lamas têm um elevado teor de humidade, o que provoca um aumento significativo dos custos de transporte por tonelada de lama. Para além destes inconvenientes importa referir também, a disponibilidade dos solos para se proceder ao espalhamento das lamas que, poderá representar um problema assim como a entidade legal que regula esta atividade. Em Portugal esta atividade é regulamentada pelo D.L. nº 276/2009. Simão, (2011) testou ainda várias outras aplicações sustentáveis como forma de valorização das lamas. Uma dessas aplicações passa pela sua aplicação em compostagem que, não é mais do que uma tecnologia de tratamento na qual a matéria orgânica se decompõe biologicamente, a partir da oxidação biológica dos compostos orgânicos, em condições aeróbias controladas, até que estas estejam preparadas para serem manipuladas e

armazenadas e posteriormente aplicadas nos solos agrícolas. A primeira etapa da compostagem, considerada como a estabilização das lamas, tem a duração aproximada de 21 dias e ocorre em 3 estágios de atividade distintos, associados às temperaturas observadas, mais especificamente, mesofílica, termofílica e arrefecimento. A segunda etapa da compostagem é a fase de maturação do composto que consiste na decomposição lenta dos compostos mais difíceis de degradar (lenhina, hemicelulose e outros polímeros). Durante esta fase, os nutrientes passam da forma orgânica para a forma mineral e, após, aproximadamente 30 dias, já se pode considerar que o composto se encontra maturado e passível de ser aplicado no solo, Castanheira, Fernandes, Ferreira, (2003), Simão, (2011). As vantagens do uso desta tecnologia seguem a mesma linha da sua utilização nos solos para a agricultura. Não é necessário um grande investimento capital, não exige uma grande complexidade tecnológica e introduz nutrientes e matéria orgânica nos solos. No entanto existem algumas limitações associadas a este processo, tais como, a necessidade de áreas disponíveis para desenvolvimento do processo de compostagem e, os elevados custos associados ao transporte de manuseamento, preparação e transporte

Outro autor a estudar a tecnologia de compostagem foi Oliveira, (2009), testou a possibilidade de valorização das lamas resultantes do tratamento de efluentes e das cinzas provenientes da caldeira de biomassa. Tal como foi verificado anteriormente pelo trabalho de Simão, (2011), a compostagem é uma opção viável para o escoamento destes resíduos aliado a vantagens ambientais bastante significativas. Durante o desenvolvimento do seu estudo, o autor salienta que, existe uma forte necessidade e importância na elaboração de um plano de aplicação de forma a assegurar o cumprimento de todas as regulamentações ambientais e legais que esta atividade acarreta associado a uma constante monitorização. O processo de compostagem em condições adequadas apresenta como principais aspetos, a obtenção de corretivos orgânicos, a neutralização de agentes patogénicos, a eliminação de substâncias fito-tóxicas (efeito tóxico sobre plantas), o aumento da estabilidade da matéria orgânica, a eliminação de germes/sementes indesejados, o fácil manuseamento e a eliminação de maus odores, e esquematiza-se na figura 3.5.

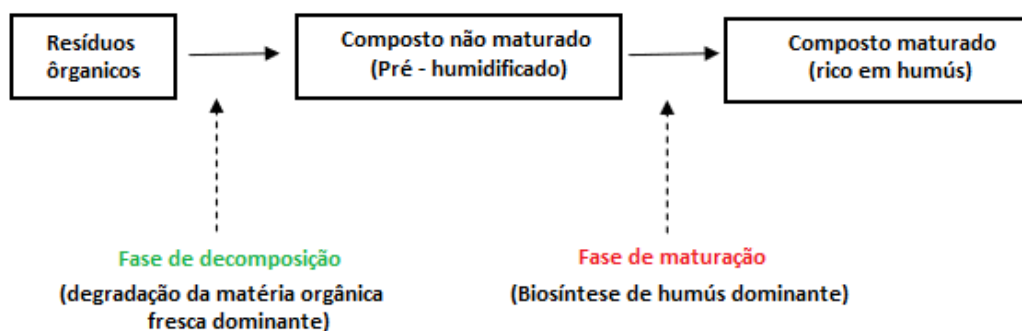


Fig. 3.7 - Esquema simplificado da evolução contínua dos resíduos orgânicos ao longo da compostagem. [Mustin, 1987, In: Santos (2001), Oliveira, (2009)]

Durante o seu trabalho, o autor realizou um processo de compostagem com duração de três meses, cuja proporção de resíduos utilizada foi ótima não sendo necessário introduzir azoto (figura 3.8).



Fig. 3.8 - Aspeto de cada um dos resíduos a compostar e mistura final (no centro). [Oliveira, (2009)]

Obteve-se um composto de qualidade, maturado com um aroma a terra, seco, mais escuro, não fitotóxico, com uma granulometria homogênea, e com valores ótimos de pH, matéria orgânica e, com boa capacidade de arejamento e porosidade, apresentando no entanto alguns condicionamentos na quantidade de água de reserva e facilmente utilizável, muito provavelmente potenciado pela sua elevada perda de humidade na fase de maturação, e que apresenta boa qualidade como composto. Também se registou uma redução do volume inicial até cerca de 50 %, o que corresponde a uma redução nos custos quando comparados com o transporte de lamas frescas. Referindo também que, houve uma redução significativa dos teores da maior parte dos metais pesados no composto final. Para além disto o composto apresentou boas qualidades agrícolas para uso como substrato hortícola. Esta solução para além de melhorar as características físico-químicas do solo e promover um impacto positivo em áreas degradadas, reduz também os efeitos nocivos para o ambiente e reduz o consumo de combustíveis fósseis. No entanto, este processo ainda envolve custos bastante

elevados, como os custos associados ao transporte e custos de manuseamento, o que acaba por levar a uma menor aderência por parte das empresas.

Para além de valorizar as cinzas provenientes combustão da biomassa na produção de energia no setor da construção como um material cimentício, Coelho, (2010) avaliou as opções de gestão das cinzas geradas na combustão da biomassa na produção de energia, identificou e caracterizou as centrais existentes, atualmente e num futuro próximo, ao qual fez uma estimativa da produção de cinzas. A partir do Inventário Florestal Nacional também estimou a disponibilidade da biomassa e a proximidade relativa a cada central, percebendo se esta seria suficiente. Neste trabalho o autor também desenvolveu um estudo, que teve como base uma central de cogeração de uma indústria de produção de pasta e papel, onde foram recolhidas amostras de cinzas volantes e de fundo, de um sistema de combustão em grelha e um sistema em leito fluidizado. Durante a realização deste estudo o autor refere também a grande potencialidade das cinzas como um material de qualidade a incorporar nos solos para agricultura. Existe viabilidade técnica na sua utilização em solos agrícolas e florestais desde que o mercúrio e os compostos orgânicos sejam devidamente quantificados, de modo a confirmar esta possibilidade. Esta solução para além de ter como vantagem o escoamento de toneladas de cinzas, a sua utilização nos solos é bastante benéfica, uma vez que as cinzas apresentam um elevado valor nutritivo. Citando o autor; Segundo o Decreto-Lei que regula a deposição de lamas na agricultura, tanto as cinzas volantes como as cinzas de fundo compreendem reduzidos teores de metais pesados, características que permitem a sua utilização. Relativamente a deposição em aterro, as cinzas apresentam valores de lixiviado que permitem a sua prática, uma vez que estes não estão classificados como resíduos perigosos. No entanto, a opção pela deposição em aterro só deve ser feita quando não for possível nenhum outro processo de reciclagem ou valorização técnica ou economicamente viável. A valorização das cinzas enquanto produto agrícola poderá ser uma mais valia para o setor, uma vez que este resíduo tem uma forte componente nutritiva acumulada nas cinzas durante a recolha da biomassa.

3.4. Outras aplicações

Modolo et al., (2012) testaram a possibilidade de reciclar as cinzas de fundo provenientes da combustão da biomassa da indústria da celulose como material alternativo para usar no mesmo processo em que elas são produzidas, ou seja, como substitutas da areia de leito fluidizado na própria produção da pasta e do papel. Para o efeito, foi desenvolvida uma monitorização com um período de um ano (ano de 2011) da cinza de fundo, no sentido de controlar a sua composição

química e detetar possíveis alterações no caso de a reutilizar. As cinzas de fundo do leito resultam de descargas periódicas do leito, que entre outras razões, estão relacionadas com a necessidade de renovação e substituição do leito no sentido de se evitar a sua aglomeração e desfluidificação. Para a caracterização química, foi selecionada a fração de cinza de fundo do leito com partículas de tamanho entre 0,3 e 1,0 mm, e foi realizada a caracterização para o maior e menor elemento químico das cinzas através de aspetos obtidos por espectroscopia por fluorescência de raio -X Fluorescente (XRF). Os resultados comprovaram que houve alterações na distribuição de tamanho do grão das cinzas durante os primeiros seis meses de 2011, notando-se uma grande variabilidade. Existe viabilidade técnica na reutilização da cinza no leito fluidizado, tendo em consideração que é necessário proceder á sua peneiração antes da sua reutilização num novo leito. Os resultados revelaram também que as cinzas de fundo do leito analisadas apresentaram um baixo teor de matéria orgânica, tal como, normalmente se verifica em câmaras de combustão de leito fluidificado borbulhante.

Em Portugal, no sector da indústria de pasta e papel são produzidas em média, cerca de 300 mil toneladas/ano (matéria húmida) de lamas. O recurso à prática de procedimentos adequados e sustentáveis de gestão destes resíduos, garante a redução de custos, o aumento da vida útil dos aterros industriais, a redução das fragilidades potenciais dos passivos ambientais e maiores garantias de cumprimento das exigências legais. Face às outras alternativas de gestão, a combustão, como destino final das lamas, surge como uma alternativa atrativa e apresenta como vantagens, a possibilidade de aproveitamento de energia por recuperação do calor da combustão, a redução do volume final de material a tratar (cinzas), baixando consequentemente os custos de manuseamento, preparação e transporte das lamas, e a destruição dos compostos orgânicos. [Simão, (2011)]

Este autor desenvolveu um trabalho que teve como principal foco a valorização das lamas provenientes da produção da pasta e do papel, através da sua co-combustão juntamente com resíduos florestais, os quais são normalmente incinerados neste tipo de atividade, em caldeiras de leito fluidizado com o intuito de produzir energia. Neste contexto foram realizados quatro ensaios de combustão de biomassa, a uma escala piloto com incorporação de percentagens de biomassa + resíduo que variam desde os 100 %, em massa, de biomassa, 100 %, em massa, de biomassa com 20 %, em massa, de lamas secundárias, 80 %, em massa, de biomassa com 10 %, em massa, de lamas primárias e 10 % de lamas secundárias, e 90 % de biomassa com 5 % de lamas primárias e 5 % de lamas secundárias. Durante a realização dos ensaios com biomassa + resíduo na produção de energia verificou-se que a inclusão das lamas (primárias e secundárias) não afetaram significativamente o valor da eficiência de conversão de combustível a qual ficou acima dos 99 % em

todos os ensaios. Os resultados dos ensaios revelaram que a inclusão de lamas no processo de combustão de biomassa, em teores baixos (5 % a 10 %) não afetou significativamente a qualidade das cinzas geradas e dos efluentes atmosféricos, no entanto o mesmo não se verificou para os lixiviados, com variações significativas nos lixiviados das cinzas do 1º e do 2º ciclone, consequência dos ensaios realizados com lamas primárias. Em termos económicos, esta tecnologia do leito fluidizado borbulhante, trata-se de um processo com alta eficiência e com altos custos associados, uma vez que o uso desta tecnologia não permite a conversão da caldeira existente para uma de leito fluidizado, e o combustível usado exige ser de alta qualidade, como o carvão ou resíduos de madeira com elevado poder calorífico.

4. Estudo de valorização dos resíduos - Caso de estudo

Durante a realização deste trabalho foi desenvolvida inicialmente, uma pesquisa bibliográfica, com foco no estudo de valorização dos resíduos, de forma a se conhecer as aplicações estudadas e desenvolvidas até aos dias de hoje, por vários autores. Desta forma, foi possível destacar as aplicações de valorização que apresentaram melhor viabilidade técnica, económica e ambiental para os vários resíduos estudados.

A reciclagem ou reutilização dos resíduos nas mais variadas soluções de aplicação revelaram, ser uma alternativa bastante ecológica e sustentável e, em quase todas as aplicações com baixos custos associados. Através da adoção destas soluções de valorização dos resíduos é possível reduzir significativamente a quantidade de resíduo que segue para aterro, a extração de novos recursos naturais, o consumo de energia, a degradação ambiental e os custos associados de aquisição de matérias-primas naturais.

Para o desenvolvimento deste caso de estudo, foi escolhida uma solução de valorização de cinza de fundo, como um material alternativo as matérias-primas naturais. A cinza de fundo é um resíduo gerado na produção da pasta e do papel que foi aqui utilizada como um substituto parcial dos agregados que constituem o betão. A opção de estudar e desenvolver esta solução de valorização surgiu no âmbito da pesquisa bibliográfica realizada aquando do desenvolvimento do estado de arte do presente trabalho. Verificou-se que a cinza de fundo é um resíduo já bastante estudado e aplicado em diversas soluções sustentáveis desenvolvidas por inúmeros autores, revelando em quase todos os casos a viabilidade técnica do produto final. Revelou ser um resíduo de elevado potencial tanto para o setor da construção civil, como para os solos na agricultura, entre outras aplicações.

No entanto, verificou-se que a integração das cinzas de fundo nas composições de betão ainda não é uma solução muito explorada, tendo sido desenvolvidos alguns estudos neste campo, em que a cinza de fundo é utilizada como substituta parcial do cimento, mas quase sempre com resultados menos desejáveis. Alguns destes autores, Modolo et al., (2006) e Coelho, (2010), defendem a necessidade da realização de mais estudos acerca da durabilidade para garantir a qualidade das cinzas em aplicações práticas. Por esse motivo estudou-se e explorou-se esta solução de aplicação das cinzas de fundo na incorporação de um betão convencional.

4.1. Desenvolvimento de uma base de dados com uma lista de soluções e valorização dos resíduos da celulose

4.1.1. Metodologia

A metodologia utilizada para a realização e elaboração da base de dados teve, como base principal o agrupamento de dados bibliográficos obtidos durante a elaboração do estado de arte deste trabalho. Tal como se pode verificar na figura 4.1, a tabela da pesquisa bibliográfica desenvolvida teve como principais entradas, os resíduos principais provenientes da indústria da celulose, depois relativamente a cada resíduo uma pesquisa detalhada, tendo em consideração os autores que os estudaram e quais as suas principais soluções de valorização. A última entrada da tabela da pesquisa bibliográfica refere-se a todas as soluções de aplicação adotadas para cada resíduo, e se estas apresentaram viabilidade técnica, ambiental e económica.

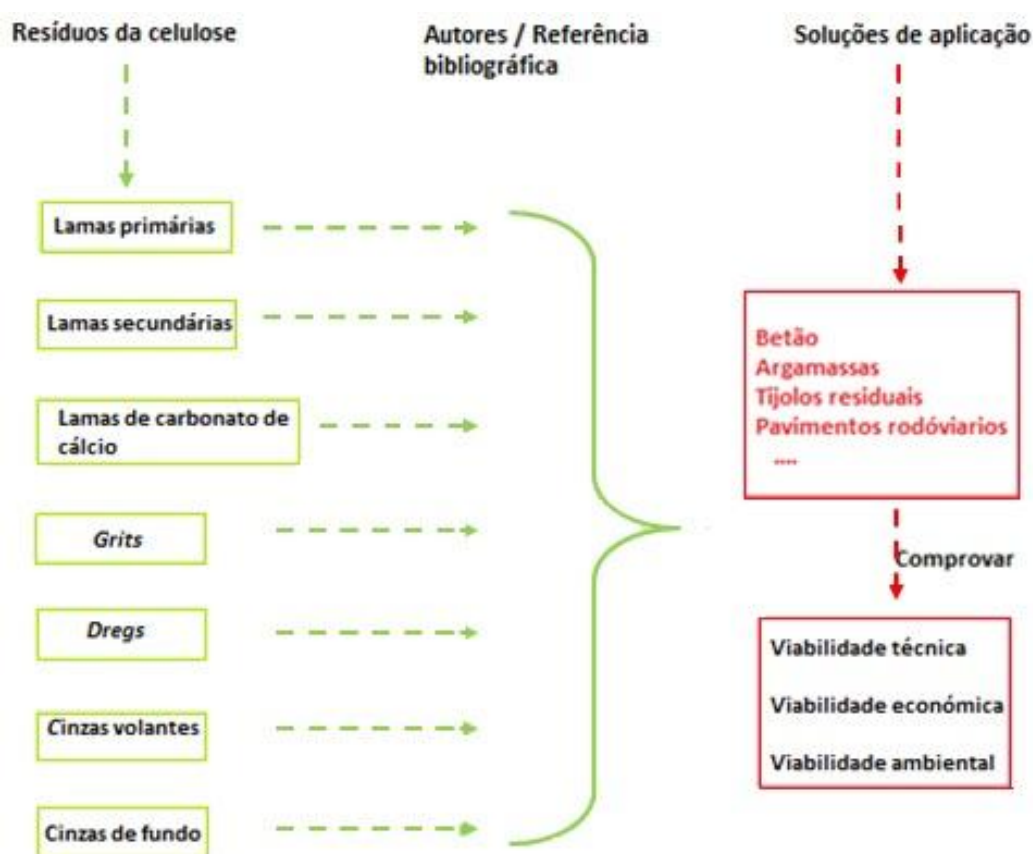










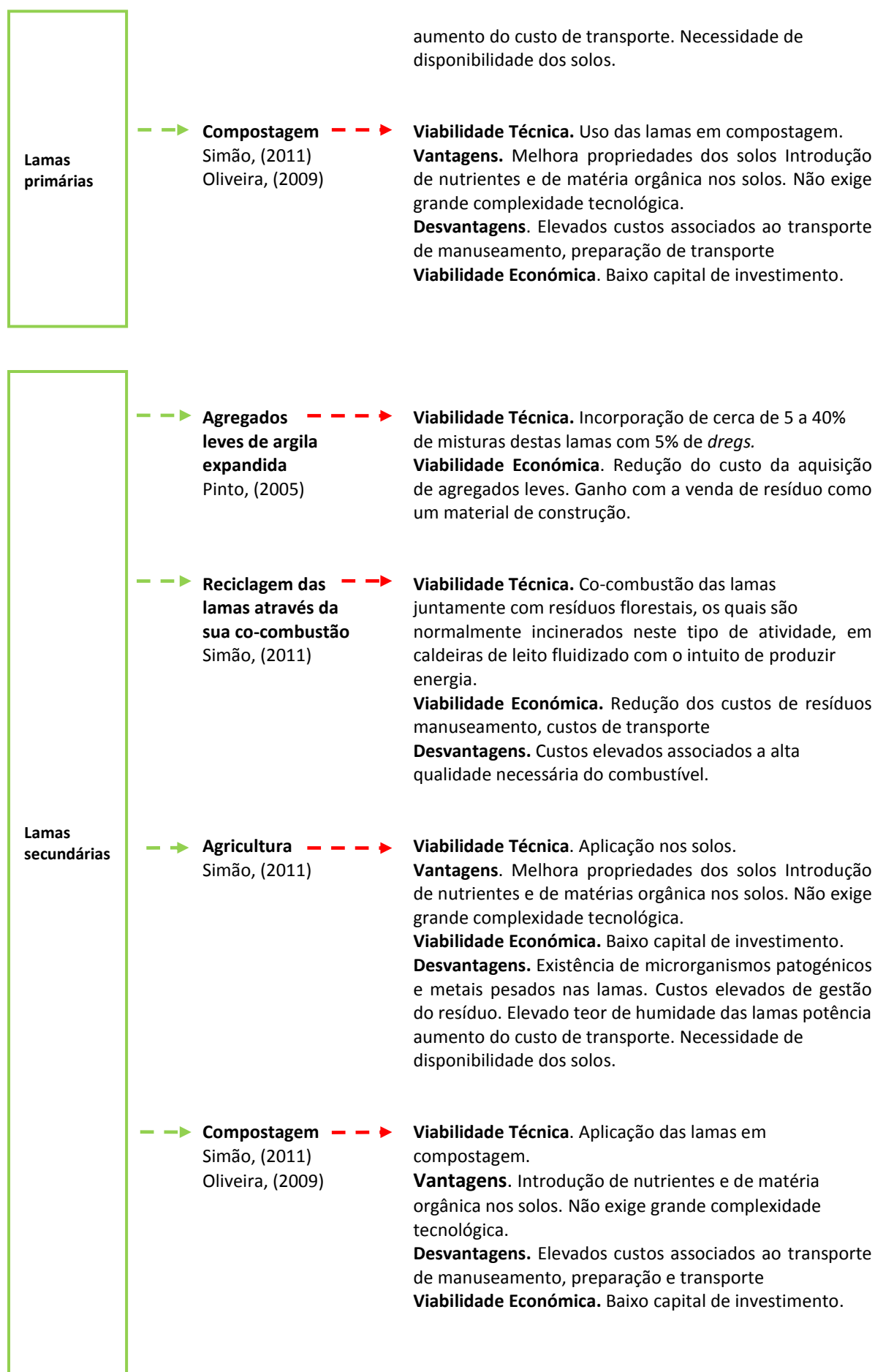
Fig. 4.1 - Descrição dos principais tópicos estudados e desenvolvidos durante a construção da base de dados.

A base de dados foi organizada tendo em consideração as entradas na figura acima, obtidas durante o desenvolvimento da pesquisa bibliográfica. Desta forma surge em primeiro lugar o resíduo em estudo, seguido da área de aplicação que lhe corresponde, com uma breve referência bibliográfica, e

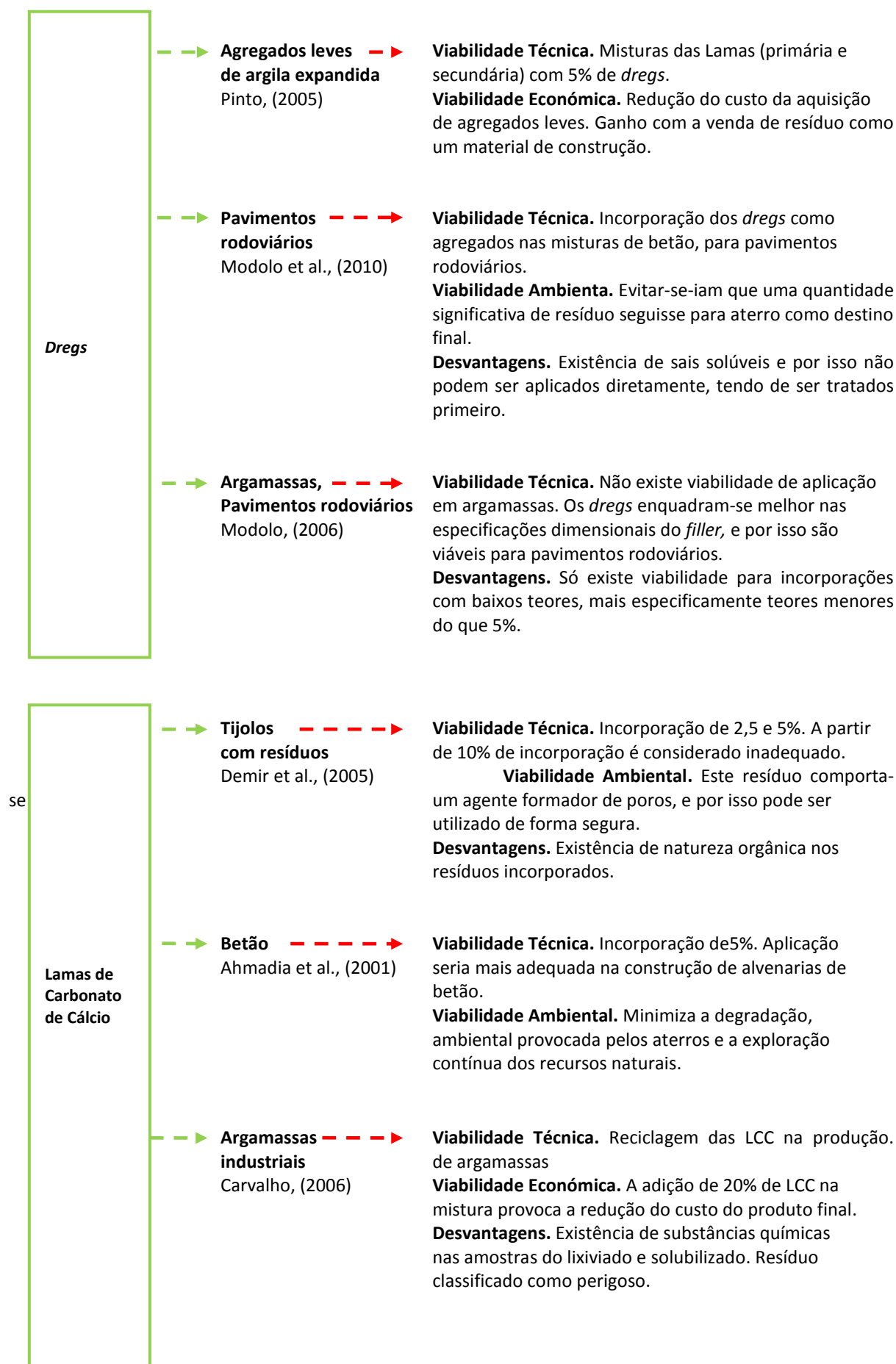
por último os respetivos detalhes relativamente á sua viabilidade, vantagens e desvantagens da sua aplicação. O objetivo é conseguir sistematizar a informação recolhida de modo a facilitar a transferência de conhecimento para o setor empresarial (gerador ou recetor de resíduo) para fazer chegar as soluções de valorização até ao mercado.

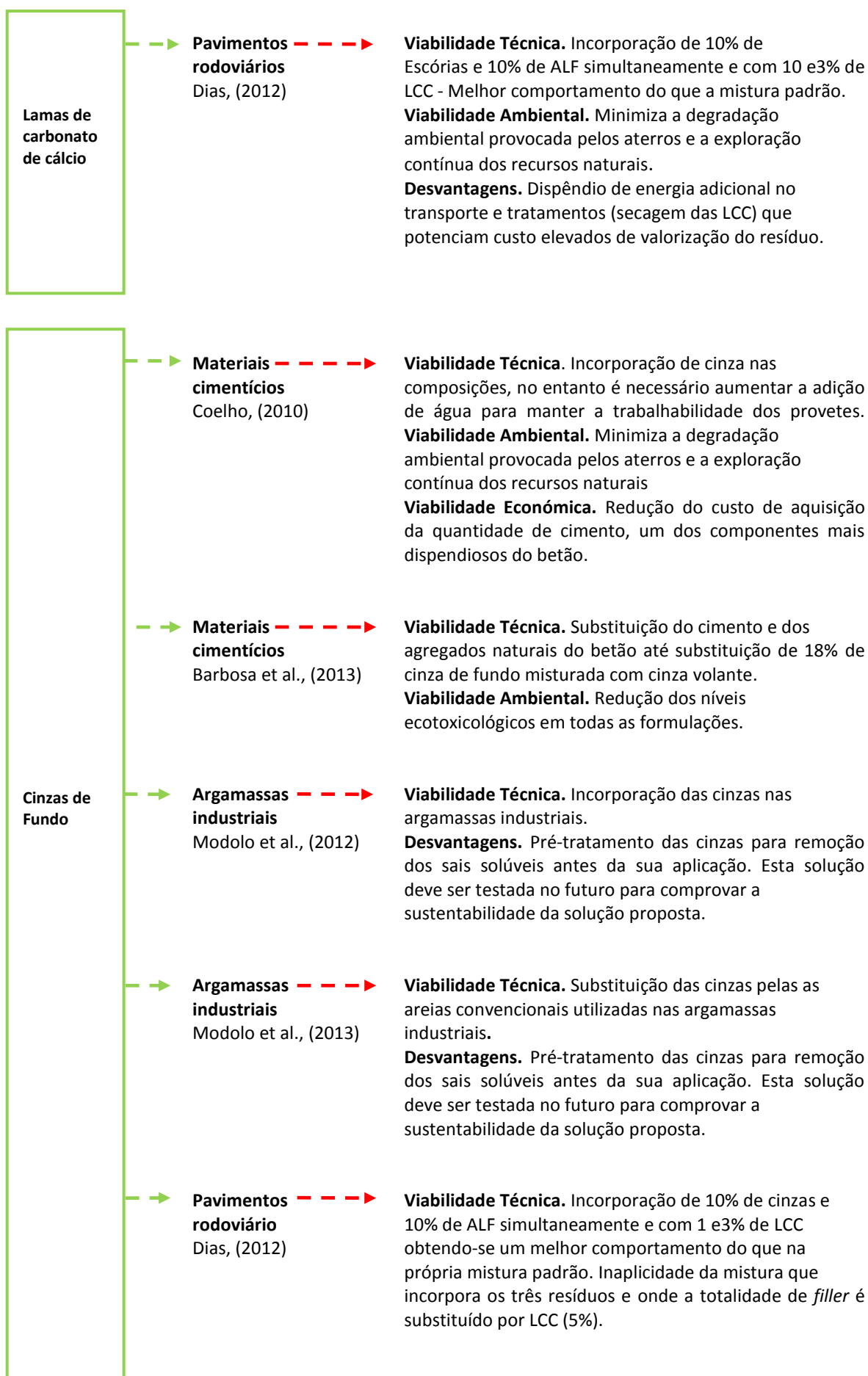
4.1.2. Base de dados resíduos - soluções

Resíduo estudado	Solução de aplicação	Viabilidade/Vantagens e Desvantagens
Lamas primárias	 Telhas ou chapas de fibrocimento Modolo et al. (2011)	 Viabilidade Técnica. Incorporação de lamas até 25%, em peso. Viabilidade Ambiental Reduz quantidade de resíduo para aterro, minimiza exploração de matérias-primas naturais. Viabilidade Económica Redução o custo de exploração de recursos naturais. Redução custos de transporte.
	 Agregados leves de argila expandida Pinto, (2005)	 Viabilidade Técnica. Incorporação de cerca de 5 a 30%. Incorporação na matriz argilosa de 10 a 20%. Viabilidade Económica. Reduz o custo da aquisição de agregados leves. Ganho com a venda de resíduo como um material de construção. Vantagens. Garantia de inertização dos elementos potencialmente tóxicos contidos nas composições, uma vez que existe a sua reação com a matriz argilosa a alta temperatura.
	 Reciclagem das lamas através da sua co-combustão Simão, (2011)	 Viabilidade Técnica. Co-combustão das lamas juntamente com resíduos florestais, os quais são normalmente incinerados neste tipo de atividade, em caldeiras de leito fluidizado com o intuito de produzir energia. Viabilidade Económica. Redução dos custos de manuseamento e, nos custos de transporte. Desvantagens. Ecotoxicidade dos lixiviados. Custos elevados associados a alta qualidade do combustível.
	 Agricultura Simão, (2011)	 Viabilidade Técnica. Aplicação nos solos. Vantagens. Melhoria das propriedades dos solos. Introdução de nutrientes e de matéria orgânica nos solos. Não exige grande complexidade tecnológica. Viabilidade Económica. Baixo capital de investimento. Desvantagens. Presença de microrganismos patogénicos e metais pesados nas lamas. Custos elevados de gestão do resíduo. Elevado teor de humidade das lamas potência



Grits	→ Tijolos com resíduos Siqueira et al., (2013)	→	Viabilidade Técnica. Substituição até 30% do cimento <i>Portland</i> . Viabilidade Ambiental. Redução das emissões de gases de efeito estufa, na produção dos tijolos (sem exigência altas temperaturas). Viabilidade Económica. Redução da quantidade de cimento a usar o que potencia a redução do custo de aquisição do cimento.
	→ Tijolos de barro Demir et al., (2005)	→	Viabilidade Técnica. Incorporação de 2,5 e 5% de resíduo. Viabilidade Ambiental. Este resíduo comportou-se como um agente formador de poros, e por isso pode ser utilizado de forma segura. Desvantagens. Existência de natureza orgânica provocou necessidade de aumentar a capacidade de isolamento do tijolo.
	→ Blocos Prensados de encaixe de solo cimento Pinheiro et al., (2013)	→	Viabilidade Técnica. Incorporação de solo- <i>grits</i> de 37,5-62,5%. Viabilidade Ambiental. Minimiza a degradação ambiental provocada pelos aterros e a exploração contínua dos recursos naturais.
	→ Betão Lima, (2010)	→	Viabilidade Técnica. Incorporação dos <i>grits</i> em 25% a 50%, como substituto da rocha gnaisse, apenas em betões de enchimento e em betões a aplicar em pavimentos que posteriormente serão revestidos. Viabilidade Ambiental. Minimiza a degradação ambiental provocada pelos aterros e a exploração contínua dos recursos naturais.
	→ Pavimentos Rodoviários Modolo et al., (2010)	→	Viabilidade Técnica. Aplicação dos <i>grits</i> diretamente como um agregado, na segunda camada de topo, camada de betuminoso denso. Viabilidade Económica. Compatibilidade dos <i>grits</i> com a pedra britada reduz o custo de aquisição de matérias primas.
	→ Materiais cimentícios Pavimentos rodoviários e Argamassas Modolo, (2006)	→	Viabilidade Técnica. Incorporação destes resíduos na produção de cimento <i>Portland</i> . <i>Grits</i> são mais adequados para serem utilizados em pavimentos rodoviários, devido a sua distribuição granulométrica.

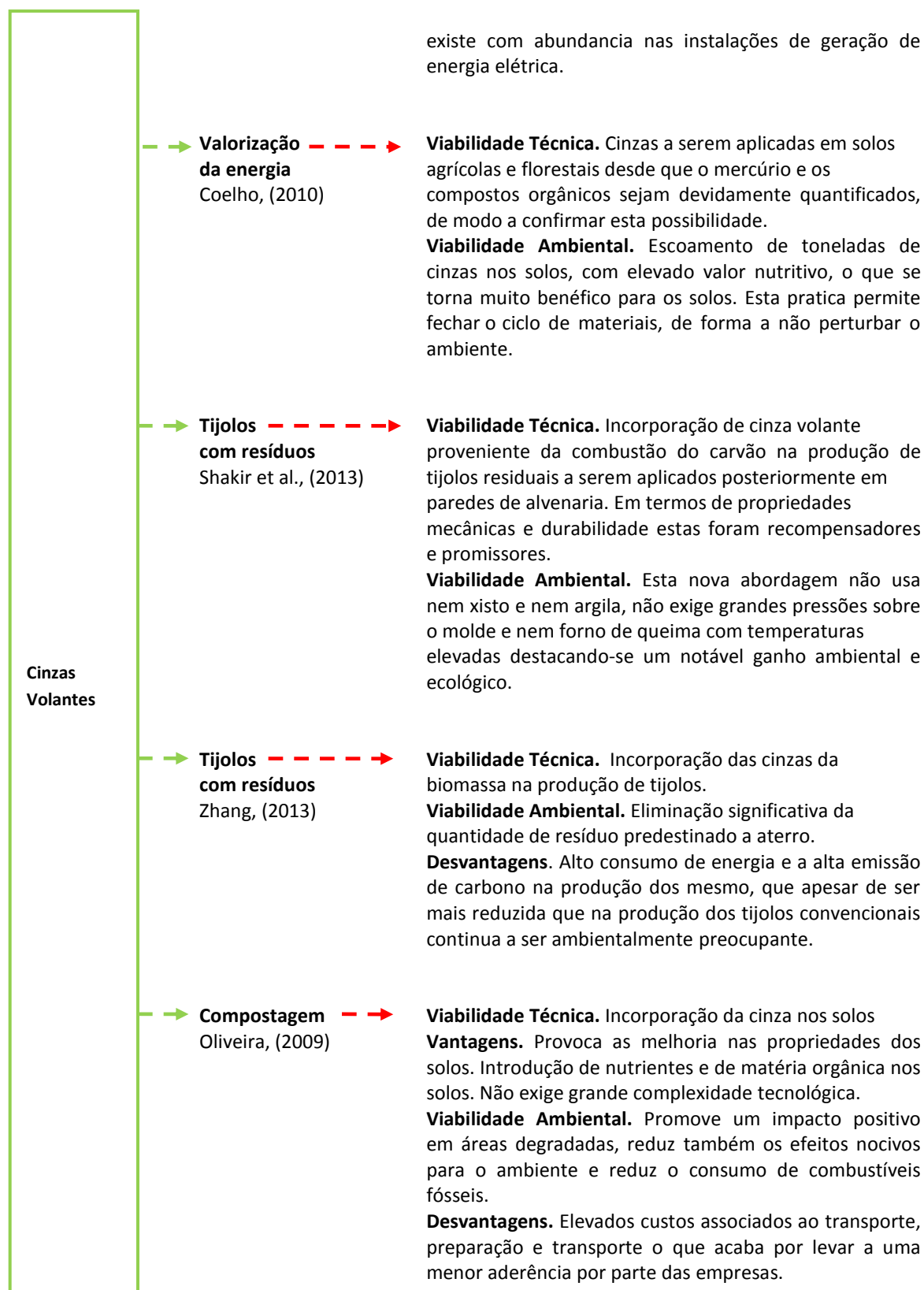




Cinzas de Fundo			<p>Viabilidade Ambiental. Minimiza a degradação ambiental provocada pelos aterros e a exploração contínua dos recursos naturais.</p> <p>Desvantagens. Dispendio de energia adicional no transporte e tratamentos (secagem das LCC) que potenciam custo elevados de valorização do resíduo.</p>
	→	<p>Misturas betuminosas, Reciclagem em leito fluidizado, Argamassas industriais Modolo et al., (2012)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Incorporação das cinzas de fundo até 10% nas misturas betuminosas, uma vez que estas apresentam uma maior estabilidade. Recomenda-se o ajuste destas formulações de argamassas em estudos futuros.</p> <p>Desvantagens. Presença de sais solúveis obriga ao tratamento das cinzas antes da sua aplicação. Na tentativa de reutilizar os resíduos em novas aplicações é necessário controlar alguns elementos químicos como o Ca, Na e K, de modo a evitar a sua potencial aglomeração</p>
	→	<p>Argamassas industriais Reciclagem das cinzas no próprio leito fluidizado Modolo, (2006)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Utilização das cinzas na produção de argamassas. Re-utilização das cinzas no próprio leito fluidizado.</p> <p>Desvantagens. Presença de sais solúveis implica o tratamento das cinzas antes da sua aplicação. No caso da sua reutilização no leito é necessário proceder á sua peneiração antes da sua reutilização num novo leito.</p>
	→	<p>Pavimentos rodoviários Jackson et al., (2009)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Cinzas provenientes da combustão da biomassa para produção de energia serem aplicadas como materiais base para pavimentos.</p> <p>Viabilidade Ambiental A cinza hidratada apresenta uma rigidez igual ou melhor que a pedra cal. Esta solução reduz a quantidade de resíduo a depositar em aterro. Reduz a exploração de recursos naturais.</p> <p>Viabilidade Económica. Redução dos custos de aquisição de matérias primas. Ganho na venda do resíduo por parte da industria de produção de energia.</p>
	→	<p>Valorização da energia Coelho, (2010)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Cinzas serem aplicadas em solos agrícolas e florestais desde que o mercúrio e os compostos orgânicos sejam devidamente quantificados, de modo a confirmar esta possibilidade.</p> <p>Viabilidade Ambiental. Escoamento de toneladas de cinzas nos solos, com elevado valor nutritivo, o que se muito benéfico para os solos. Esta pratica permite fechar ciclo de materiais, de forma a não perturbar o ambiente.</p>
	→	<p>Compostagem Oliveira, (2009)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Aplicação das cinzas nos solos.</p> <p>Vantagens. A colocação das cinzas nos solo provocam melhorias significativas nas suas propriedades. Introdução de nutrientes e de matéria orgânica nos solos.</p> <p>Viabilidade Ambiental. Promove um impacto positivo</p>

Cinzas de fundo		<p>em áreas degradadas, reduz os efeitos nocivos no meio ambiente e reduz o consumo de combustíveis fósseis.</p> <p>Viabilidade Econômica. Baixo capital de investimento. O volume inicial da cinza reduz até cerca de 50%, o que corresponde a uma redução nos custos de transporte quando comparados com o transporte de lamas frescas.</p>
Cinzas Volantes	<p>→ Materiais cimentícios — — — — — Coelho, (2010)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Incorporação de cinza volante em teores de 10%, 20% e 30%, em materiais cimentícios. São necessários mais estudos acerca da durabilidade para garantir a qualidade das cinzas em aplicações práticas.</p> <p>Viabilidade Econômica. Redução significativa dos custos associados à sua deposição em aterro assim como, a sua formulações de betão teriam como vantagem a redução quantidade de cimento, um dos componentes mais dispendiosos do betão.</p>
	<p>→ Betão — — — — — Mohammed et al., (2012)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Incorporação das cinzas volantes na produção de um betão. Trabalhabilidade da mistura diminui com o aumento da dosagem de resíduo incorporado.</p> <p>Viabilidade Ambiental. Minimiza a degradação ambiental provocada pelos aterros e a exploração contínua dos recursos naturais.</p>
	<p>→ Jet grouting. — — — — — Cristelo et al., (2013)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Incorporação de cinza volante numa argamassa de injeção a ser aplicada na estabilização dos solos através do <i>jet grouting</i>, e embora se tenha registado uma adequada viabilidade estrutural, foram levantadas algumas preocupações sobre a questão da sua viscosidade aparente.</p> <p>Viabilidade Ambiental. A possibilidade de usar ligantes alternativos na estabilização dos solos contribui para a redução dos elevados níveis de CO₂, libertados durante a produção do cimento.</p>
	<p>→ Materiais cimentícios — — — — — Barbosa et al., (2013)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Substituição até 10% das cinzas volantes pelo cimento, com valores semelhantes a formulação de referência.</p> <p>Viabilidade Ambiental. Os níveis de emissão de espécies químicas manteve-se e, por vezes até se registou uma redução na emissão dos mesmos comparativamente à formulação de referência.</p>
	<p>→ Materiais cimentícios — — — — — Atis et al., (2009)</p>	<p>Viabilidade Técnica. Incorporação de cinzas como substitutas do cimento em betões reforçados com fibras de aço, uma vez que se verificou que o seu comportamento é semelhante ao de um betão de cimento <i>Portland</i> com adição de cinzas volantes.</p>

Cinzas Volantes			Viabilidade Ambiental. Minimiza a degradação ambiental provocada pelos aterros e a exploração contínua dos recursos naturais.
	→ Betão →	Karahan et al., (2011)	Viabilidade Técnica. Incorporação das cinzas volantes na constituição do betão, com registo de pequenas melhorias da resistência, no entanto, o mesmo não se regista para a incorporação das fibras de aço no betão. Viabilidade Ambiental. Minimiza a degradação ambiental provocada pelos aterros e a exploração contínua dos recursos naturais.
	→ Betão →	Mohammed et al., (2011)	Viabilidade Técnica. Incorporação das cinzas volantes na constituição do betão como um substituto do cimento <i>Portland</i> , com registos de melhoria das suas propriedades de durabilidade. Diminuição da trabalhabilidade da mistura com o aumento do teor de resíduo incorporado. Viabilidade Económica. Redução significativa dos custos da obra.
	→ Argamassas industriais →	Rajamma et al., (2009)	Viabilidade Técnica. Incorporação das cinzas volantes em teores de 10% a 20%. Viabilidade Ambiental. Eliminação significativa da quantidade de resíduo predestinado a aterro. Desvantagens. Pré-tratamento das cinzas para remoção carbono, cloretos e do sulfato.
	→ Pavimentos rodoviários →	Jackson et al., (2009)	Viabilidade Técnica. Utilização das cinzas como um estabilizador para solo arenoso local e, a serem aplicadas como materiais base para pavimentos. Viabilidade Ambiental. A cinza hidratada apresenta uma rigidez igual ou melhor que a pedra cal. Esta solução reduz a quantidade de resíduo a depositar em aterro e, minimiza a exploração de recursos naturais. Viabilidade Económica. Redução dos custos de aquisição de matérias primas. Ganho na venda do resíduo por parte da indústria de produção de energia.
	→ Pavimentos rodoviários →	Ahmaruzzaman, (2010)	Viabilidade Técnica. Cinzas volantes geradas na combustão do carvão a serem usadas na estabilização dos solos de aterro ao longo das estradas Viabilidade Ambiental. Escoamento de toneladas de resíduo predestinado a aterro. Viabilidade Económica. Por ser um material facilmente disponível aliado as suas propriedades físicas positivas, fazem das cinzas um material de solo estabilizador com grande potencial e associado a um custo eficaz. Vantagens. Em locais em que o material utilizado para o enchimento dos solos é escasso, a cinza de fundo pode ser uma boa alternativa a este material, uma vez que



Parte da informação aqui recolhida será futuramente integrada numa plataforma de valorização de resíduos, cuja construção está a ser realizada num projeto em que a Universidade de Aveiro é copromotora (plataforma *Shared Waste Solution*).

4.2. Caso de Estudo - "Valorização de cinzas de fundo num betão convencional"

4.2.1. Enquadramento

A gestão dos resíduos gerados na produção da pasta e do papel é vista atualmente como uma prioridade ambiental de maior relevância, devido ao aumento da quantidade de resíduo produzido nos últimos anos. Em 2013 foram produzidos em Portugal cerca de 2 488 mil Ton de pastas de fibra virgem e neste processo foram gerados cerca de 28 620 Ton de cinza de fundo, dados fornecidos pelo boletim estatístico (BE) CELPA, (2012). Tendo em consideração os dados fornecidos pela Somague, (2010), o consumo de betão pronto foi de cerca de 122.414,85 Ton, nesse mesmo ano. Utilizar este resíduo como matéria-prima no setor da construção civil, não só escoaria, quase na totalidade, a quantidade de cinza de fundo gerada no processo de combustão da biomassa como também evitaria a extração contínua das matérias-primas convencionais.

A utilização dos resíduos como materiais para a construção, não só deve resolver o problema dos resíduos, como também fornecer um novo recurso para a construção, Ahmadi et al., (2001). Os locais destinados para a deposição destes resíduos nos solos como destino final, estarão esgotadas em pouco tempo, e associados a esta prática existem ainda os custos elevados de deposição em aterro e os custos relacionados com a aquisição de matérias-primas tradicionais.

Neste estudo, pretendeu-se incorporar as cinzas de fundo provenientes da combustão da biomassa como agregado nas formulações de betão, substituindo-as parcialmente pelas britas e areia. As cinzas foram caracterizadas química e fisicamente. Uma vez comparadas as cinzas de fundo com as areias convencionais usadas como agregado, verificou-se que estas apresentam uma composição bastante variada, composta tanto por partículas de diâmetros reduzidos, semelhantes a areia, como também se encontram fragmentos de pedras ou rochas, com diâmetros superiores a 2 mm.

Outro fator a ter em consideração é a quantidade de cloretos presentes nas cinzas de fundo, que podem comprometer significativamente o comportamento do betão, mais especificamente, no caso de betão armado ou pré-esforçado. Apesar de neste estudo não se ter efetuado qualquer processo de lavagem das cinzas de fundo antes da sua aplicação, salienta-se a importância do mesmo, para controlar a concentração dos cloretos das cinzas da biomassa convém recorrer primeiro a um

processo de lavagem com água, melhorando assim a qualidade das mesmas para integrar em betões.

4.2.2. Desenvolvimento experimental

4.2.2.1. Matérias-primas

Na produção do betão utilizou-se cimento, ligante hidráulico de resistência de 32,5 N do tipo 2/BL, brita 8/12 e brita 12/25, de origem calcária, areia crivada lavada e originária do rio, e super plastificante, SIKAPLAST 805, cor castanho, lote: 00654, e em conformidade com a norma EN 934-2:2009. A Cinza de fundo foi o resíduo utilizado como material alternativo, e é composta essencialmente por areia proveniente da combustão da biomassa no leito fluidizado (figura 4.2).



Fig. 4.2 - Matérias-primas utilizadas nas formulações do betão.

A granulometria representa o processo de distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que compõem os agregados do betão, e cuja distribuição se realiza por agitação das partículas através de uma série de peneiros, organizados por ordem crescente, ou seja a malha mais larga na parte superior e a malha mais apertada na parte inferior, e pesa-se o material retido em cada peneiro. Este procedimento permite determinar a percentagem da massa dos resíduos com a mesma dimensão granulométrica, contidos em cada peneiro. Para o efeito recorreu-se à seguinte série de peneiros ASTM de malha quadrada em milímetros, 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; e 31,5 (figura. 4.3).

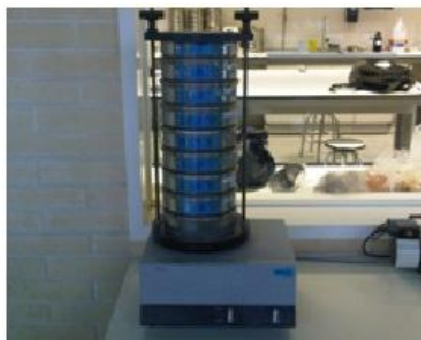


Fig. 4.3 - Série de peneiros utilizada em mesa de agitação para análise granulométrica. [Dias, (2012)]

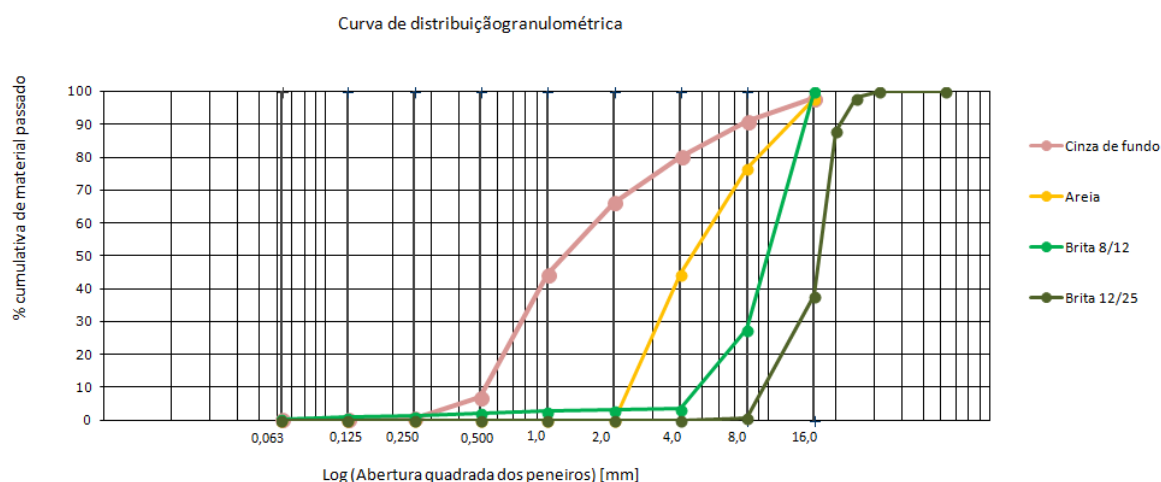


Fig. 4.4 - Curvas de distribuição granulométrica dos agregados da mistura de betão.

Por análise da figura 4.4 pode-se verificar que a cinza de fundo apresenta uma granulometria bastante heterogênea, constituída maioritariamente por partículas finas com diâmetros <2mm, correspondente a areias, e por partículas mais grossas correspondente a fragmentos de pedras ou rochas, com diâmetros mais elevados. Os restantes agregados apresentam uma composição homogênea e por isso de fácil manipulação no sentido de incorporar a cinza na mistura de betão como substituta parcial dos agregados que o constituem.

4.2.2.2. Massa volúmica da Cinza de Fundo

A massa volúmica da cinza de fundo não é mais do que a relação entre a massa de cinza de fundo seca em estufa e o volume que esta ocupa dentro de água. Este ensaio foi realizado pelo método do picnómetro que é apropriado para agregados que passam pelo peneiro 31,5 mm e são retidos no peneiro 0,063 mm. Para o efeito registou-se o peso do provete após secagem em estufa, enquanto o

volume foi determinado a partir do peso de volume de água deslocado pelas partículas secas num picnómetro, cujo volume é conhecido, tal como se apresenta na figura 4.5.

A massa volúmica dos restantes agregados é já conhecida, por se tratarem de materiais bastante correntes no nosso laboratório.

Este ensaio está em conformidade com a norma NP EN 1097-6, (2003).

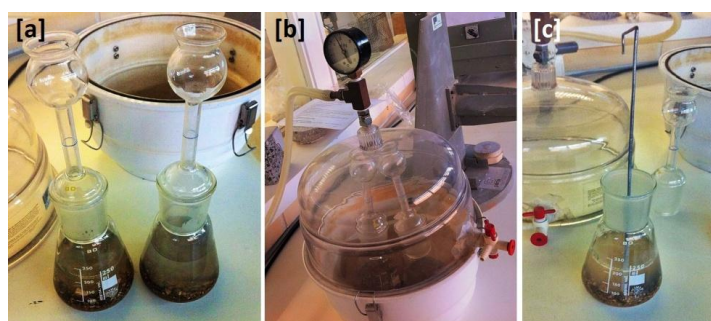


Fig. 4.5 - Massa volúmica da cinza de fundo pelo método do picnómetro.

[a] Picnómetros M(80) e M(70) com cinza de fundo antes de serem colocados na máquina de pressão; **[b]** Picnómetros dentro da máquina de pressão a 15 Pa; **[c]** Cinza de fundo a ser agitada com ferro para tirar bolhas de ar.

A massa volúmica (ρ) foi obtida a partir da equação 4.1:

$$\rho = \frac{(M_2 - M_1)}{[V - (M_3 - M_2)] / \rho_w} \quad [\text{Eq. 4.1}]$$

Onde,

M_1 - massa do picnómetro e funil [g];

M_2 - massa do picnómetro, funil e provete elementar [g];

M_3 - massa do picnómetro, funil, provete elementar e água [g];

M_4 - massa do picnómetro, funil e água [g];

M_5 - massa da amostra seca [g];

M_6 - massa da amostra saturada [g];

V - volume do picnómetro [mL];

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em megagramas por metro cúbico [Mg/m^3];

Tabela 4.1 - Massa volúmica da cinza de fundo pelo método do picnómetro.

Amostras	ρ (g/cm^3)	$\rho_{\text{média}}$ g/cm^3
M (80)	2,68	2,7
M (77)	2,71	

E tal como se pode verificar pela tabela 4.1 o valor obtido para a massa volúmica da cinza de fundo foi de aproximadamente $\rho_{cinza\ fundo} = 2,70 \text{ g/cm}^3 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$.

4.2.2.3. Caraterização química e mineralógica da cinza de fundo

Os dados utilizados na caraterização química e mineralógica das cinzas de fundo foram obtidos através do estudo realizado pelo Modolo et al., (2014) e Pinho, (2014), uma vez que se trata do mesmo material.

Procedeu-se análise mineralógica das cinzas de fundo com intuito de determinar as fases cristalinas presentes nas amostras de resíduo por difração de raio-X (DRX). Relativamente a análise química, esta foi realizada através da técnica de espectroscopia por fluorescência de raio-X (FRX), que é indicada para determinação de óxidos e elementos metálicos em amostras sólidas. Neste trabalho não se realizou o ensaio de quantificação de cloretos, ao qual é determinada a concentração de cloretos solúveis presentes nas amostras de cinza de fundo, para se avaliar a sua potencialidade a nível ambiental e a sua potencialidade de aplicação enquanto matéria prima nas misturas de betão, no entanto convém salientar a sua importância e referir que as cinzas devem de ser pré tratadas (lavadas e peneiradas) de forma a reduzir a quantidade de cloretos (Cl-), em conformidade com a norma EN 1015- 17:2000.

4.2.2.4. Formulação de betão pelo método de Faury

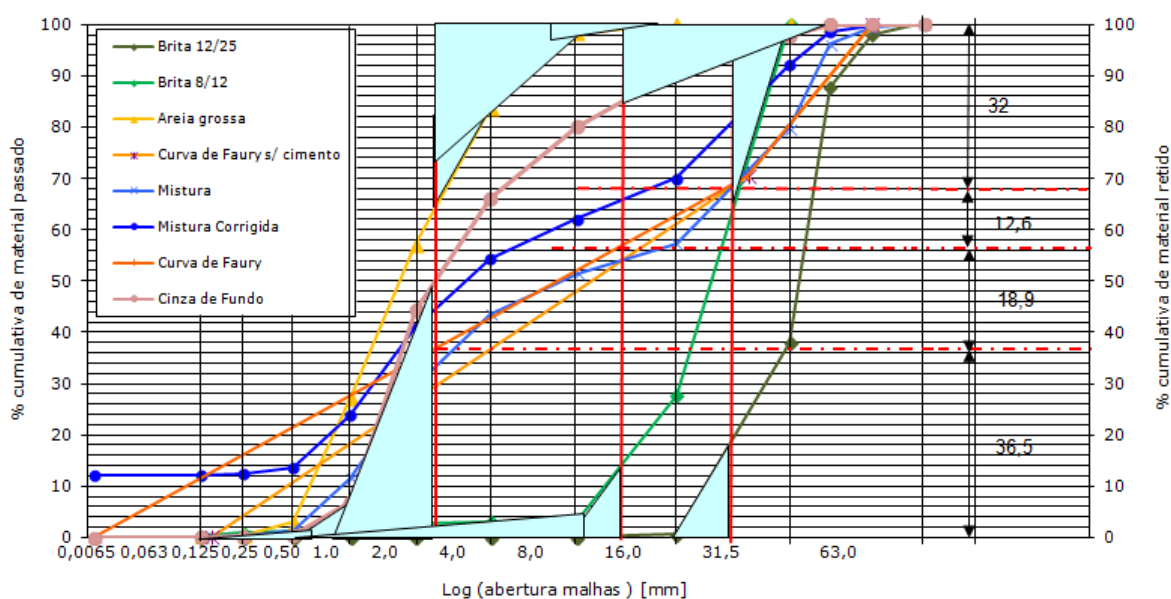
Para o desenvolvimento e elaboração do nosso caso de estudo foram desenvolvidas dez formulações de betão. Foram produzidas três formulações de betão com teor de água de $200 \text{ m}^3/\text{m}^3$ betão e, sete formulações de betão com teor de água de $180 \text{ m}^3/\text{m}^3$ betão (tabela 4.2). A fração de cinza de fundo a incorporar na composição de betão variou entre 0 %, em massa, respeitante às duas mistura de referência *Bref1_CO* e *Bref2_C2*, até 30 %, em massa, de forma avaliar o betão com melhor comportamento, com base no método de *Faury*. [Coutinho, (1988)]

Tabela 4.2 - Formulações de betão desenvolvidas (razão w/c, com, w - água; c - cimento).

Misturas	Teor de cinza de fundo incorporada	Dosagem de água na mistura	Razão w/c
<i>Bref1_C0 (referência)</i>	0%	200 m ³ / m ³ betão	0,57
<i>B1_C15</i>	15%		
<i>B1_C30</i>	30%		
<i>Bref2_C0 (referência)</i>	0%	180m ³ / m ³ betão	0,51
<i>B2_C5</i>	5%		
<i>B2_C10</i>	10%		
<i>B2_C10>1</i>	10% (>1mm)		
<i>B2_C10>2</i>	10% (>2mm)		
<i>B2_C15</i>	15%		
<i>B2_C30</i>	30%		

4.2.2.4.1. Cálculo pelo método de Faury

Fez-se o ajustamento da granulometria dos agregados à curva de referência, obtendo-se assim o teor de cada um, de modo a que no conjunto, a sua composição se aproximasse o máximo possível da curva de referência. Este método impõe ainda que os valores dos módulos de finura da curva dos agregados e da de referência sejam bastante próximos. Neste contexto fez-se o ajustamento das suas quantidades à curvas de referência de *Faury*, de forma a obter a melhor curva de mistura dos agregados. Deste ajuste gráfico (figura 4.6) da relação das curvas granulométricas com a curva de referência de *Faury* resultam os primeiros teores para os agregados na mistura.

**Fig. 4.6** - Exemplo da curva granulométrica dos agregados que compõem a composição B1_C15.

De seguida foi necessário separar o teor do cimento da areia e, para o efeito, calculou-se o teor de cimento na soma dos volumes dos agregados finos e do cimento contidos na curva granulométrica. Para se determinar a dosagem dos componentes do betão (tabela 4.3) partiu-se da fórmula fundamental dos componentes do betão, que é dada por $1=i+e+c+v$ (por m^3 de betão).

Tabela 4.3 - Volume dos componentes do betão em $1m^3$.

Dosagem do cimento	350 kg/ m^3
Massa volúmica	3,16 kg/ dm^3
Volume do cimento, c	$\frac{350 (0,001)}{3,16} = 0,111 m^3$
Volume de água, e (arbitrado)	0,200 m^3
Volume de vazios, v (arbitrado)	0,015 m^3
Volume total	$\Sigma(c+v+e) = 0,326 m^3$
Volume dos agregados, i	$1m^3 - 0,326 = 0,674 m^3$
Volume de sólidos	$c+i = 0,785 m^3$

Logo a percentagem do cimento na totalidade dos elementos sólidos é 14,1 %.

A atribuição dos valores para os parâmetros de *Faury*, A, que corresponde à trabalhabilidade da curva de *Faury*, e B, que diz respeito á compacidade (tabela 4.4) [Coutinho SA, Vol II, LNEC, Lisboa, (1988)].

Tabela 4.4 - Parâmetros de *Faury*.

A = 30	Modulo de Finura
B = 2,0	4,44

Na tabela 4.5 apresentam-se as respetivas massas volúmicas dos agregados que constituem o betão.

Tabela 4.5 - Massas volúmicas dos agregados (ρ).

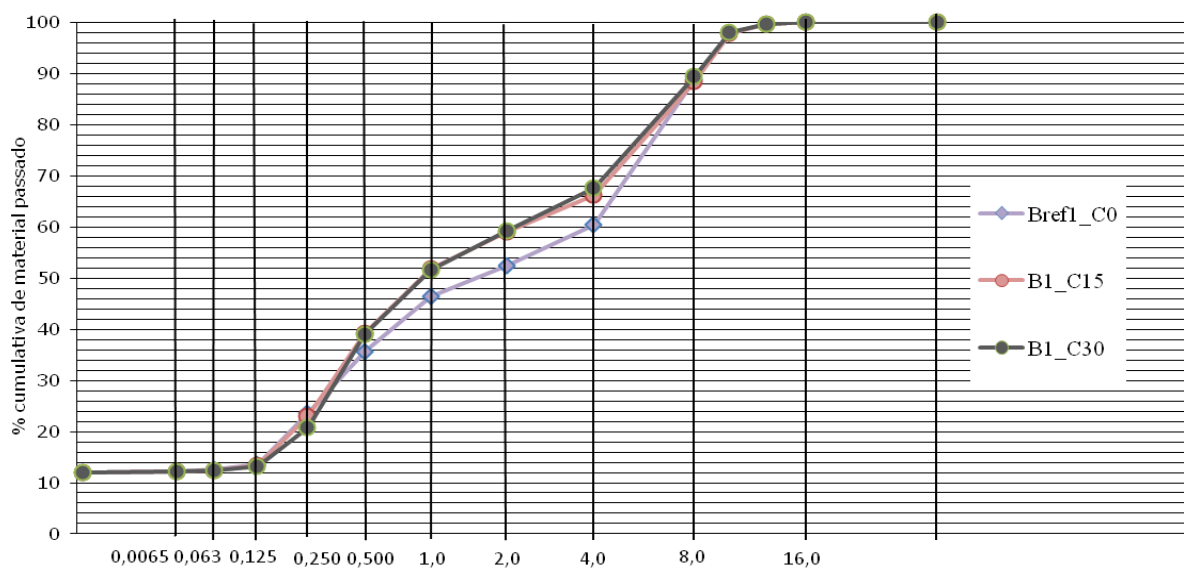
Brita 12/25	2,66 Kg/dm ³
Brita 8/12	2,66 Kg/dm ³
Cinza de fundo	2,70 Kg/dm ³
Areia	2,61 Kg/dm ³
Cimento	3,16 Kg/dm ³

De seguida acertaram-se as percentagens dos agregados tendo em consideração o módulo de finura e a curva de *Faury* sem cimento (tabela 4.6)

Tabela 4.6 - Teor dos agregados da mistura *Bref1_C0* quando comparadas com a curva de referência.

Brita 12/25	31%
Brita 8/12	21,40%
Areia e cimento	47,60%
Cimento (calculada anteriormente)	14,10%
Areia	47,6 - 14,1 = 33,5%
Modulo de finura	5,97%

Por tentativas gráficas aproximou-se, tanto quanto possível, a curva dos agregados com a de referência obtendo-se assim, uma curva de mistura corrigida e respetivas quantidades dos agregados (figura 4.7 e 4.8)

**Fig. 4.7** - Curvas das misturas granulométrica da 1ª referência.

B1_C15 e *B1_C30* aproximadas com a curva *Bref1_C0*; *Bref1_C0* - Mistura de referência com 0% de cinza de fundo; *B1_C15* - Mistura com 15% de cinza de fundo; *B1_C30* - Mistura com 30% de cinza de fundo.

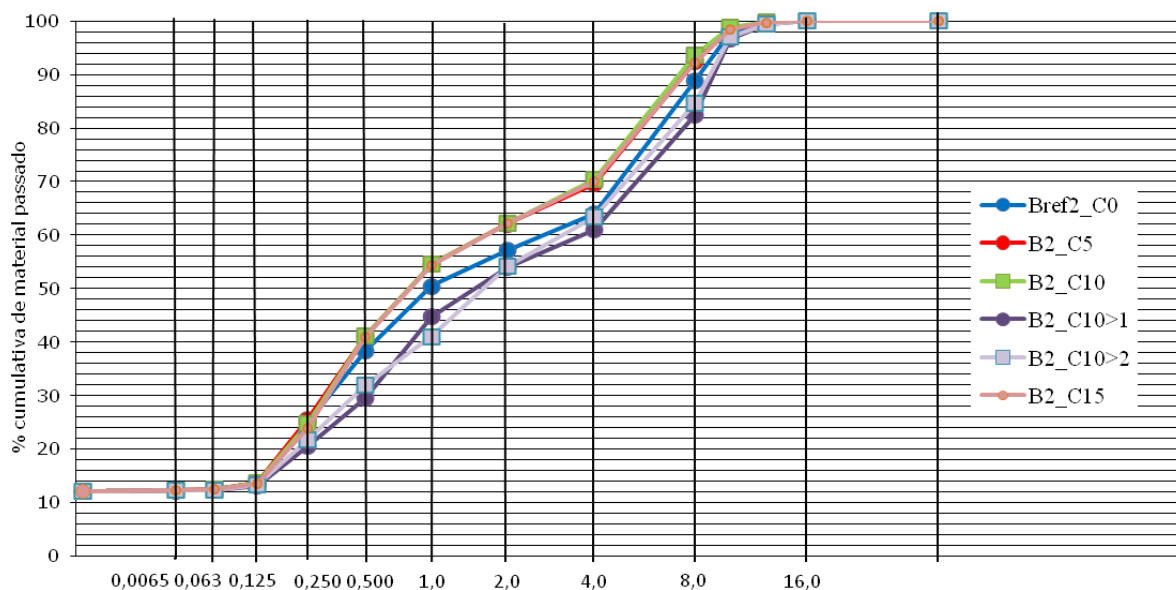


Fig. 4.8 - Curvas de mistura granulométrica da 2ª referência.

B2_C5, *B2_C10*, *B2_C10>1*, *B2_C10>2*, *B2_C15* aproximadas com a curva *Bref2_C0*; *Bref2_C0* - Mistura de referência com 0% de cinza de fundo; *B2_C5* - Mistura com 5% de cinza de fundo; *B2_C10* - Mistura com 10% de cinza de fundo; *B2_C10>1* mm- Mistura com 10% de cinza de fundo >1 mm; *B2_C10>2*mm- Mistura com 10% de cinza de fundo >2 mm; *B2_C15* - Mistura com 15% de cinza de fundo.

Apresentam-se nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, as percentagens corrigidas dos agregados para cada composição de betão, respetivamente a cada referência, 1ª referência para as composições com 200 m³ de dosagem de água e 2ª referência para as formulações com 180 m³ de dosagem de água.

w/c m³ (200 /350)

Tabela 4.7 - Dosagens corrigidas dos agregados para a composição de 1ª referência.

	<i>Bref1_C0</i>	<i>B1_C15</i>	<i>B1_C30</i>
Brita 12/25 (%)	18	12	8
Brita 8/12 (%)	25	23	22
Areia (%)	44,9	37,9	27,9
Cinza de fundo (%)	-	15	30
Cimento (%)	14,1	14,1	14,1

w/c m³ (180 /350)

Tabela 4.8- Dosagens corrigidas dos agregados para a composição de 2ª referência.

	Bref2_CO	B2_C5	B2_C10	B2_C15	B2_30
Brita 12/25 (%)	18	12	10	12	8
Brita 8/12 (%)	25	25	26	23	22
Areia (%)	44,9	45,9	41,9	37,9	27,9
Cinza de Fundo (%)	-	5	10	15	30
Cimento (%)	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8

Fração mais grossa da Cinza de fundo

Tabela 4.9 - Dosagens corrigidas dos agregados para a composição de 2ª referência mas com a fração mais grossa da cinza de fundo (>1mm e >2 mm).

	B2_C10 >1mm	B2_C10 >2mm
Brita 12/25 (%)	28	24
Brita 8/12 (%)	12	19,8
Areia (%)	37,9	34,1
Cinza de Fundo (%)	10	10
Cimento (%)	13,8	13,8

4.2.2.4.2. Ensaios de caracterização do betão

Para a caracterização física das composições de betão foram realizados ensaios do betão no seu estado fresco e ensaios no estado endurecido, aos 28 dias de cura do betão. O ensaio de trabalhabilidade pelo cone de *Abrams (Slump)* foi realizado no betão no estado fresco, e pretendeu determinar a trabalhabilidade do betão, por análise do abaixamento do cone de *Abrams*. O ensaio de compressão ao betão, realizado aos 28 dias de cura do betão, pretendeu determinar a resistência á compressão de cada composição de betão. Também se efetuou o ensaio de avaliação do comportamento mecânico dos provetes de betão endurecido com o PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital) (ultra-sons), de forma a se determinar o módulo de elasticidade elástica das composições de betão. E neste contexto, também se realizou o ensaio de penetração de cloretos, após 30 dias submerso em água salgada marítima, o ensaio de absorção por capilaridade e o ensaio de absorção por imersão dos provetes em água.

4.2.2.5. Moldagem e cura dos provetes de betão

Para cada uma das formulações desenvolvidas para o nosso caso de estudo foram preparados 6 provetes, dois dos quais de forma cilíndrica e os restantes quatro de forma cubica, cujas dimensões são 7,5 cm de diâmetro e 30,5 cm de altura para o cilindro e 15 cm de lado para o cubo (figura 4.9). As dimensões dos provetes estão em conformidade com a norma EN 12390-1.

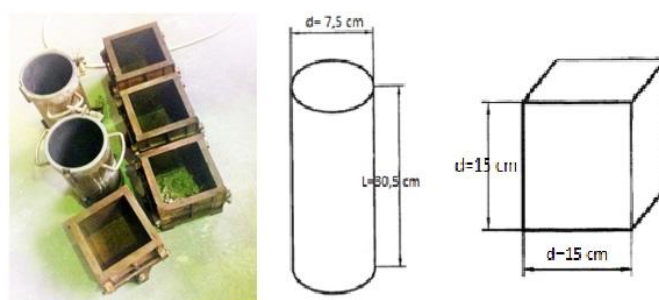


Fig. 4.9 - Forma e dimensões dos provetes.

Antes do enchimento do molde, revestiu-se a superfície interior com um lubrificante, de forma a impedir a aderência do betão ao molde. Durante o enchimento do molde, o provete foi compactado duas vezes, a primeira vez realizou-se a meia altura de enchimento do molde, com uma vibração mecânica constante durante 20 seg., evitando encostar nas laterais e sem tocar no fundo do molde (figura 4.10) A segunda vez foi realizado com o molde cheio, e voltou-se a vibrar pelo mesmo método, durante mais 20 seg. Finalizando-se com a aplicação da vibração nas bordas exteriores do molde [b]. A compactação completa obtém-se quando deixa de aparecer grandes bolhas de ar à superfície do betão, e a superfície se apresenta relativamente lisa, com um aspeto vidrado e sem segregação excessiva [c].

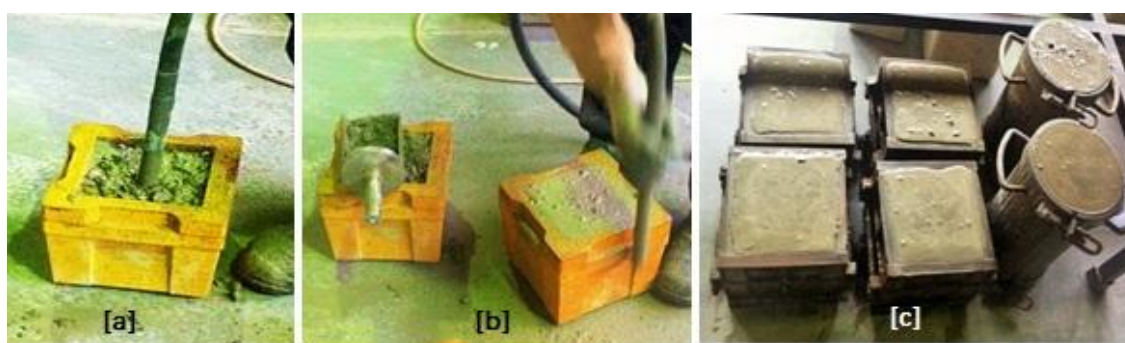


Fig. 4.10 - Moldagem e compactação dos provetes.

[a] Vibração sem encostar nas laterais do molde; [b] Vibração aplicada nas bordas exteriores do molde; [c] Moldagem e compactação final dos provetes de ensaio.

Relativamente á cura dos provetes de ensaio, estes permaneceram no molde pelo menos 16 horas, a uma temperatura ambiente de aproximadamente 15°C. Após a remoção do molde, o processo de cura do provete continua na camara climática à temperatura de 20°C e a uma humidade relativa (HR) de 95 %, até imediatamente antes da realização dos ensaios. Todos os aspetos discutidos neste parágrafo e no anterior estão em conformidade com a norma EN 12390-2.

4.2.2.6. Caraterização do betão no estado fresco

Neste ensaio determinou-se a consistência do betão fresco (trabalhabilidade) pela medida do seu abaixamento. O valor de abaixamento do cone de *Abrams* desejado para o betão está compreendido entre 40 a 140 mm, correspondente a classe de trabalhabilidade S1 e S2.

Na realização deste ensaio utilizou-se um molde de forma tronco cónica cone de *Abrams* (figura 4.11), respeitando as dimensões e todos os requisitos impostos pela norma EN 12350-2.



Fig. 4.11 - Cone de *Abrams* com a camada de topo já devidamente compactada, e a superfície de betão rasada.

Para que a aplicação do betão em obra se faça com sucesso é necessário assegurar que este apresente uma boa consistência (trabalhabilidade) enquanto fresco, uma vez que esta influencia diretamente nos parâmetros fundamentais relacionados com a eficácia da sua utilização, ou seja, pode comprometer a facilidade de colocação em obra, a compactação, a durabilidade e o desenvolvimento das resistências mecânicas. Um betão fresco que não apresente uma boa trabalhabilidade pode provocar a formação de defeitos e consequentemente afetar o desempenho do betão no estado endurecido.

4.2.2.7. Caraterização do betão no estado endurecido

4.2.2.7.1. Resistência à compressão

Para este ensaio os provetes com 28 dias de cura foram ensaiados até á rotura numa máquina específica à realização de ensaios de resistência a compressão (figura 4.12). Todo o procedimento experimental está em conformidade com a norma EN 12390-3, (2003).



Fig. 4.12 - Ensaio de resistência á compressão.

4.2.2.7.2. Densidade aparente

O volume aparente de cada provete cúbico foi obtido por medição direta no provete (figura 4.13), em conformidade com a norma EN 206-1 [5.5.2], e cujo lado de cada provete tem a dimensão de L=15 cm. Logo,

$$V_{aparente} = L \times L \times L \quad (m^3) \quad [Eq. 4.2]$$



Fig. 4.13 - Medição direta do provete tal como recebido.

A densidade aparente é dada pela equação 4.3,

$$\rho_{aparente} = \frac{mr}{V_{aparente}} \quad [Eq. 4.3]$$

Onde,

m_r - massa do provete tal como recebido [kg]

4.2.2.7.3. Avaliação do módulo de elasticidade pelo PUNDIT (ultra-sons)

O ensaio *Pundit* foi efetuado com um equipamento da CNSFARNELL, (2004). Trata-se de um ensaio de medição do tempo que uma onda elástica demora a atravessar determinado material, resultantes do impulso ultrassónico percorrido entre dois pontos.



Fig. 4.14 - Ensaio de ultrassons com o aparelho PUNDIT.

[a] Máquina de medição da velocidade de ondas ultra sónicas que atravessam o betão; [b] Provete de betão a ser ensaiado, *Pundit* (transmissão direta)

O tempo que uma onda ultra sónica demora a atravessar determinado material, depende da densidade de microestrutura das propriedades elásticas desse material. Pode-se dizer que quanto mais denso for o material, mais rapidamente se propagam as ondas, podendo-se avaliar durante o seu desempenho a qualidade e respetivas propriedades elásticas da amostra a ser ensaiada, tais como, a homogeneidade do betão, a presença de espaços vazios, existência de fissuras, fendas ou outras imperfeições na mistura. Este procedimento foi realizado por meio de dois eletrodotos colocados em faces opostas do provete de betão a ensaiar e, com recurso a um aparelho que gera impulsos apropriados e com precisão, mede-se o momento da sua transmissão, ou seja, o tempo que a onda demora a percorrer a distância entre os dois eletrodotos. O ensaio foi realizado após a calibração com a ajuda de uma amostra de calibração com um tempo de propagação conhecido. Após ser conhecido o tempo de propagação das ondas, valor retirado a partir do ensaio, utilizou-se a equação 4.4, para se determinar a velocidade de propagação da onda.

$$V = \frac{L}{t} \quad [\text{Eq. 4.4}]$$

Onde,

V – velocidade de propagação das ondas [km/s];

L – comprimento do percurso (aresta da provete) [mm];

t – tempo de propagação de ondas registado no dispositivo [μs].

Os módulos de elasticidade dinâmicos, determinaram-se a partir da equação 4.5. Este procedimento foi retirado do manual técnico do ensaio Farnell, (2004).

$$E = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+v)(1-2v)}{(1-v)} \quad [\text{Eq.4.5}]$$

Em que,

v - Velocidade [km/s];

E - Modulo de elasticidade dinâmico [MN/m²];

ν - Rácio dinâmico de *Poisson* =0.

ρ - Densidade real [kg.m³];

4.2.2.7.4. Resistência á Penetração de cloretos - teste de durabilidade

O transporte de cloretos para o interior do betão é um processo que ocorre apenas em meio líquido, isto é, se os poros não contiverem água não existe penetração. É através da estrutura porosa do betão que se processa a penetração, nomeadamente através da rede contínua de poros capilares da pasta de cimento e das fendas e micro fendas existentes. O procedimento experimental passou por mergulhar os provetes cilíndricos de betão em água salgada durante 30 dias, depois retirou-se cada provete e efetuou-se o ensaio de compressão diametral tal como se pode verificar na figura 4.15 [a]. Por ação da força aplicada no centro do provete cilíndrico colocado horizontalmente na máquina, gerou-se um corte a meio do provete partindo-o em duas partes mais ou menos simétricas.



Fig. 4.15 - Ensaio de durabilidade por penetração de cloretos.

[a] Provete cilíndrico na máquina de compressão lateral; [b] Metade do provete após saída da máquina de compressão a ser borrifado com nitrato de prata; [c] Medição do diâmetro da penetração dos cloretos no betão.

Para cada mistura de betão borrifou-se uma das partes provenientes da compressão lateral do provete com nitrato de prata [b] a fim de se obter a espessura de penetração dos cloretos [c] ao longo das laterais do provete.

4.2.2.7.5. Absorção de água por capilaridade

O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 16°C, e em conformidade com a norma E 393-1993. Os provetes de betão endurecido foram ensaiados aos 28 dias de cura. Antes da realização do ensaio de absorção de água por capilaridade os provetes de betão foram secos em estufa durante pelo menos 72 horas a uma temperatura de 100°C. Depois de secos e à temperatura ambiente da sala, colocaram-se os provetes num tabuleiro com água e com os suportes necessários para manter uma das faces dos provetes em contato com a água durante um determinado período de tempo (figura 4.16).



Fig. 4.16 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.

[a] Face inferior do provete em contato com a água a 5mm acima da face; [b] Tabuleiro com os provetes em contato com a água na face inferior; [c] Medição dos provetes ao fim de ti horas após a colocação em água.

Realizaram-se medições ao fim dos tempos t_i iguais a 3, 6, 24 e 72 horas a contar desde a colocação do provete em contato com a água. A absorção da água por capilaridade obteve-se através da seguinte equação:

$$A_c = \frac{m_i - m_0}{a_i} \quad [\text{Eq. 4.6}]$$

Em que,

A_c - Absorção de água por capilaridade [g/mm];

m_0 - Massa do provete tal como recebido [g];

m_i - Massa do provete no intervalo t_i , incluindo a água que eventualmente esorra deste [g];

a_i - Área da face inferior do provete que esteve em contato com a água [mm];

4.2.2.7.6. Absorção de água por imersão

Este ensaio foi realizado em conformidade com a norma NP EN 1097-6e, entende-se como absorção de água por imersão a diferença entre uma massa de um provete imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco, expressa percentagem de massa seca. Para se obter a absorção de água das amostras de betão procedeu-se a sua saturação por imersão em água de maneira a atingirem uma massa constante, durante pelo menos 72 horas (figura 4.17). Registando-se os valores das pesagens efetuadas nos provetes até que massa não variasse mais.

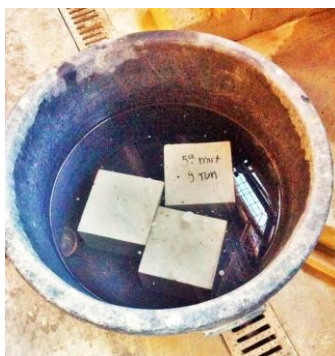


Fig. 4.17 - Provetes de betão submersos em água durante pelo menos 72 horas.

Por último registou-se os valores dos mesmos provetes completamente secos (m_0). Finalmente os valores de absorção de água por imersão são calculados através da equação 4.7.

$$A_i = \frac{m_{sat} - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\text{Eq. 4.7}]$$

Onde,

A_i – Absorção de água por imersão [%];

m_{sat} – Massa do provete saturado [g];

m_0 – Massa do provete seco [g]

4.2.3. Resultados e conclusões

4.2.3.1. Caraterização química e mineralógica da Cinza de fundo

Apresenta-se na figura 4.2.17 o difratograma obtido na realização do ensaio de difração de raio-X (DRX) desenvolvido pelos Modolo et al., (2014) e Pinho, (2014). Este ensaio mostra as fases mineralógicas existentes nas amostras de resíduo ensaiado. As fases registadas foram, quartzo (SiO_2), fase predominante, microclina (KAISi_3O_8) e albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) (figura 4.18).

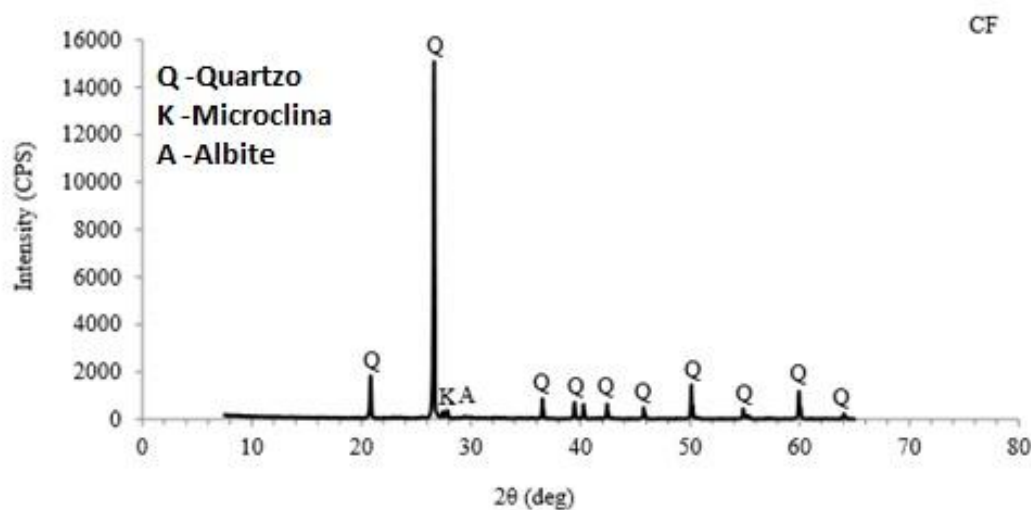


Fig. 4.18 - Difratograma de raios X das cinzas de fundo.

(Q = Quartzo (SiO_2), K = Microclina (KAISi_3O_8), A = Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)) [Pinho, 2014]

As cinzas de fundo provêm de um leito fluidizado composto por areia siliciosa, explicando-se o facto de a fase predominante ser sílica na forma de Quartzo. Também as partículas de solo florestal misturadas com resíduos florestais de biomassa, resultantes de más práticas de recolha e manuseamento da biomassa, e impurezas (partículas de solo florestal), podem contribuir para o

aparecimento da microclina e albite, como referido no estudo de Modolo et al., (2014) e Pinho, (2014). De seguida apresenta-se na tabela 4.10, retirada de Modolo et al., (2014) a composição química e mineralógica das amostras de cinza de fundo resultantes do ensaio de espectrometria por fluorescência de raio-X (FRX).

Tabela 4.10 - Composição química e mineralógica da cinza de fundo. [Modolo, (2014)]

Parâmetros		Cinza de fundo
SiO ₂	(% wt)	72,18
CaO	(% wt)	17,15
Na ₂ O	(% wt)	0,88
Al ₂ O ₃	(% wt)	2,29
MgO	(% wt)	1,96
Perda ao rubro (LOI)	(% wt)	2,08
Cl-	(mg/kg)	472
		(mm)
		(%)
		1,000
		0
Percentagem de material retido nos respetivos peneiros**		0,500
		86
		0,250
		14
		0,125
		0
		0,063
		0
Mineralogia (pelo DRX)	Quartzo	SiO ₂
		√
	Calcite	CaCO ₃
		√
	lanite	Ca ₂ SiO ₄
Mineralogia (pelo DRX)		√
	Microlite	KAlSi ₃ O ₅
		√
Mineralogia (pelo DRX)	Andalusite	Li ₂ (SiO ₄)O
		X

* Não quantificado

√ - Presença

- Não detetado

** Em conformidade com EN 933:1/200

Por análise da tabela verifica-se que existe predominância dos óxidos de quartzo (SiO₂), e de cálcio (CaO) que representam cerca de 90 %, em peso, da areia proveniente do leito fluidizado. O teor de LOI (*Loss on Ignition* – perda ao rubro) diz respeito à percentagem de material que se volatiliza a 550°C. Os resultados deste ensaio comprovam os picos gráficos do ensaio DRX, confirmando que as cinzas de fundo são constituídas essencialmente por quartzo.

4.2.3.2. Efeito da incorporação da cinza de fundo sobre o estado fresco do betão

A tabela 4.11 apresenta os valores obtidos no ensaio de trabalhabilidade pelo cone de Abrams para as composições de 1ª referência com 200 m³ de água. Os valores que se encontram destacados, são

referentes às composições que obtiveram melhor trabalhabilidade, relativamente a cada composição de betão.

Tabela 4.11 - Valores de *Slump* para as misturas da 1ª referência.

Misturas de betão	% Super plastificante	Valor de <i>Slump</i>
 <i>Bref1_CO</i>	--	135 mm
 <i>B1_C15</i>	--	45 mm
	0,10%	33 mm
	0,20%	180 mm
	0,50%	170 mm
 <i>B1_C30</i>	--	12 mm
	1,50%	Valor de <i>Slump</i> inválido

Para este betão com 200 m³ de dosagem de água, não foi possível controlar o valor da trabalhabilidade, para uma classe mais baixa de trabalhabilidade, entre valores de 40 a 100 mm, respeitantes a classe S1 e S2, e por isso optou-se por diminuir a dosagem de água para 180 m³, composições de 2ª referência. Para a composição *B1_C30* com teor de incorporação de 30 % de cinza de fundo, registou-se um valor de *Slump* inválido, devido a desagregação do betão e a ocorrência de fenómenos exsudação durante a realização do ensaio. Isto é devido, talvez, ao alto teor de cinza de fundo no betão.

Para além desta composição este fenómeno também ocorreu noutras composições de betão durante a realização dos ensaios de trabalhabilidade pelo cone de *Abrams* no betão fresco. Este fenómeno ocorre quando a água sobe até á superfície, após a colocação do betão no molde, formando uma película que permanece, por vezes, algumas horas antes da presa do betão, outras vezes observa-se a sua saída através de fendas ou locais mal vedados nos moldes (figura 4.19).




Fig. 4.19 - Fenómeno de exsudação do betão.

Parte da água exsudada atinge a superfície, mas outra parte fica retida no interior, debaixo das armaduras de betão armado ou das partículas de maiores dimensões, citando Coutinho, (1988). Ao segregar, a água cria caminhos que ficam gravados no interior do betão, dando origem a uma rede de capilares, mais notório junto á parte superior, onde a água se acumula e potencia a diluição da pasta de cimento, aumentando a relação entre os teores de água e de cimento, e diminuindo portanto a resistência desta camada. A água que fica retida no interior, debaixo das armaduras do betão armado e, das partículas de maiores dimensões da mistura altera a aderência das armaduras a mistura de betão, criando vazios por onde a água vinda do exterior pode circular com facilidade. Este fenómeno pode alterar muitas das propriedades do betão endurecido, tais como, a aderência da mistura às armaduras ou ainda, criar propriedades direcionais no betão e no betão armado, tornando a parte superior da peça menos resistente do que na parte inferior. [Coutinho, (1988)] Neste estudo a exsudação teve como principal causa a falta de finos nas composições, baixos níveis de cimento ou o excesso de água contida na mistura.

De seguida, apresentam-se nas tabelas 4.12 e 4.13, os valores obtidos no ensaio de trabalhabilidade pelo cone de *Abrams* para as composição de 2ª referência com 180 m³ de água.

Tabela 4.12 - Valores de *Slump* para as misturas da 2ª referência.

	Misturas de betão	% Super plastificante	Valor de <i>Slump</i>
	Bref2_C0	--	20 mm
		0,15%	40 mm
	B2_C5	0,20%	37 mm
		0,30%	35 mm
		0,35%	45 mm
	B2_C10	0,50%	60 mm
		0,60%	35 mm
	B2_C15	0,15%	8 mm
		0,30%	26 mm
		0,50%	70 a 100 mm
	B2_C30	0,70%	Valor de <i>Slump</i> inválido
		1%	
		2%	

Convém referir que, apesar de a composição *B2_C10* apresentar um valor de *Slump* mais baixo para a dosagem de 0,6 % de super plastificante, considerou-se que esta seria a composição mais viável, uma vez que durante a realização do ensaio da trabalhabilidade no betão fresco foi possível verificar que, entre ambas as composições foi a que apresentou um aspeto mais consistente. A composição *B2_C30* com teor de incorporação de 30 % de cinza de fundo, obteve um valor de *Slump* inválido, por se tratar de um betão muito seco, com predominância de grossos na mistura. Para esta composição também se registou a ocorrência de fenómenos de exsudação do betão. Isto é devido, talvez, ao alto teor de cinza de fundo no betão.

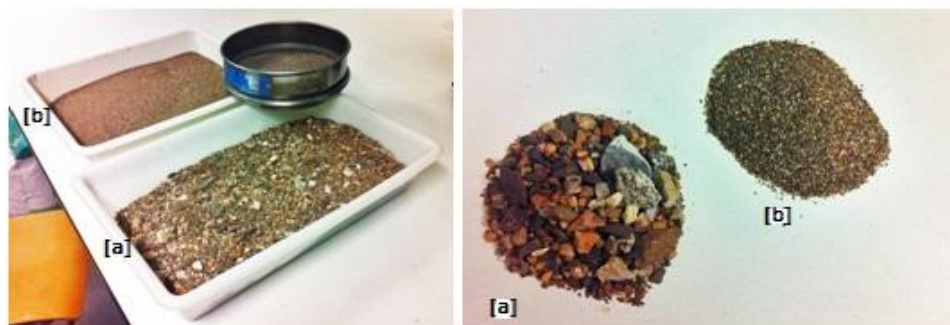
Fração mais grossa de Cinza de Fundo (>1mm e >2mm)

Fig. 4.20 - Separação das partículas de cinza de fundo retidas no peneiro 1mm.

[a] Cinza de fundo com granulometria igual ou superior a 1mm de diâmetro; [b] Cinza de fundo com diâmetro inferior a 1mm.

Para a formulação *B2_C10 >1mm* incorporou-se apenas as partículas retidas no peneiro 1 mm de cinza de fundo, ou seja trabalhou-se com as partículas de diâmetro superior ou igual a 1 mm da cinza de fundo, substituindo-a pelas britas e areia. Para *B2_C10 >2mm* utilizou-se apenas as partículas de cinza de fundo com diâmetro igual ou superior a 2 mm substituindo-a apenas pelas britas, mantendo-se a dosagem de areia e dos restantes componentes do betão.

Tabela 4.13 - Valores de *Slump* para as misturas da 2ª referência com granulometria superior a 1mm e 2mm.

	Misturas de betão	% Super plastificante	Valor de <i>Slump</i>
	<i>B2_C10 >1mm</i>	0,50%	30mm
	<i>B2_C10 >2mm</i>	0,30%	8 mm
		0,50%	35 mm
		0,60%	34 mm

Para estas composições conseguiu-se atingir valores com mais regularidade, dentro da classe de trabalhabilidade pretendida. A composição *B2_C10 >1mm* obteve um valor de *Slump* baixo e, verificou-se que este se tratava de um betão bastante seco com predominância de grossos na sua composição. Para composição *B2_C10 <2mm* verificou-se que esta atingiu o seu limite de plasticidade com adição de 0,6 % de super plastificante (SP), e que entre ambas as composições,

com 0,5 % e 0,6 % de SP, optou-se pela última (0,6 % SP), uma vez que foi a composição que apresentou melhor consistência durante a realização do ensaio de trabalhabilidade.

Nas tabelas 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam-se as composições consideradas viáveis em termos de trabalhabilidade, ou seja, que apresentaram uma consistência aceitável durante o ensaio de abaixamento do cone de *Abrams*, seguidas da respetiva classe de trabalhabilidade.

Tabela 4.14 - Valores de *Slump* para as misturas de 1ª referência.

	<i>Bref1_C0</i>	<i>B1_C15</i>
% Cinza de fundo incorporada	0%	15%
<i>Slump</i> (mm)	135	45
Classe (<i>Slump</i>)	S3	S2

Tabela 4.15 - Valores de *Slump* para as composições de 2ª referência.

	<i>Bref2_C0</i>	<i>B2_C5</i>	<i>B2_C10</i>	<i>B2_C15</i>
% Cinza de fundo incorporada	0%	5%	10%	15%
<i>Slump</i> (mm)	40	45	35	70 a 100
Classe (<i>Slump</i>)	S1	S2	S1	S2

Fração mais grossa da Cinza de fundo

Tabela 4.16 - Valores de *Slump* para as composições que incorporam a fração mais grossa da cinza de fundo.

	<i>B2_C10 > 1mm</i>	<i>B2_C10 > 2mm</i>
% Cinza de fundo incorporada	10% >1mm	10% >2mm
<i>Slump</i> (mm)	30	34
Classe (<i>Slump</i>)	S1	S1

Por análise das tabelas acima, foi possível verificar que as misturas da 2ª referência apresentam classes de trabalhabilidade mais adequadas ao pretendido, comparativamente as misturas da 1ª referência. Verificou-se também, que a adição de cinza de fundo provocou uma melhoria na trabalhabilidade do betão.

4.2.3.3. Efeito da cinza de fundo sobre o estado endurecido do betão

4.2.3.3.1. Caracterização mecânica e física

O tipo de roturas obtidas na realização do ensaio de resistência á compressão foram satisfatórias (figura 4.21) e em conformidade com a norma EN 12390-3.



Fig. 4.21 - Tipo de roturas obtidas no ensaio de Resistência Mecânica á Compressão.

Na tabela 4.17 apresentam-se os valores da força média de resistência à compressão (f_{cm}) obtidos cada composição, a partir da média de três provetes aos vinte e oito dias de cura. Nesta tabela também se apresentou a classe de trabalhabilidade, os valores de densidade aparente e o módulo de elasticidade para cada composição de betão.

Tabela 4.17 - Comportamento mecânico dos provetes de betão.

	Bref1_C0	B1_C15	B1_C30	Bref2_C0	B2_C5	B2_C10	B2_C10 >1 mm	B2_C10 >2 mm	B2_C15	B2_C30
% Cinza de fundo na composição	0%	15%	30%	0%	5%	10%	10% >1mm	10% >2mm	15%	30%
Classe de trabalhabilidade	S3	S2	S1	S1	S2	S1	S1	S1	S2	S1
f_{cm} (Mpa)	19	19	22	33	28	34	25	39	29	25
$\rho_{aparente}$	2391	2355	2320	2374	2372	2379	2384	2408	2383	2373
E (Gpa)	45,7	42,8	43,7	48,1	47,7	47,5	43,4	46,0	46,1	47,7

em que,

f_{cm} - Resistência á compressão de compressão média

$\rho_{aparente}$ - Densidade aparente

E - Módulo de elasticidade

V - Velocidade da onda ultra sónica - teste *Pundit*

Por análise da tabela 4.17, verificou-se um ganho da resistência mecânica relativamente as misturas da 2ª referência, com menor dosagem de água, quando comparadas com as misturas de 1ª referência.

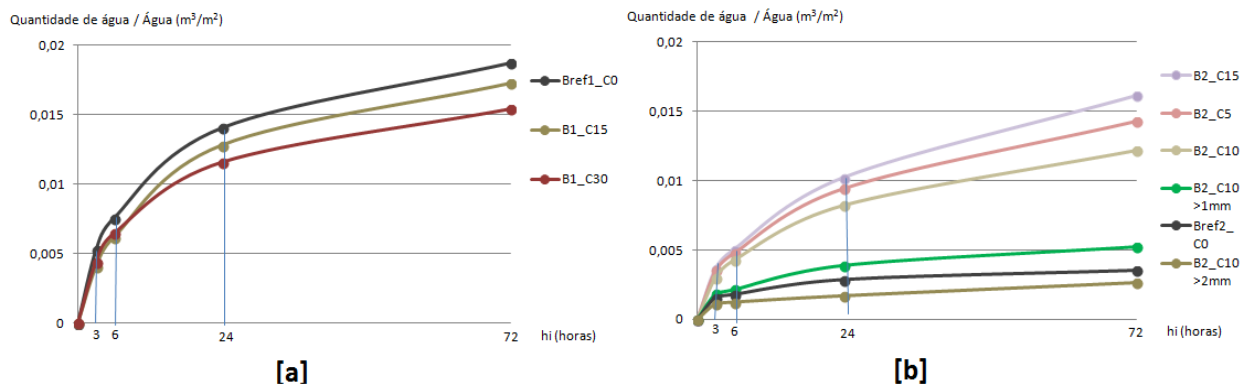
Relativamente à resistência à compressão das composições de betão verificou-se que a introdução da cinza de fundo nas composições não degradou a resistência mecânica à compressão, verificando-se que os valores obtidos de f_{cm} se encontram na mesma ordem de grandeza. Isto pode ter ocorrido devido ao bom empacotamento estrutural do betão. Verificou-se ainda que a mistura B2_C10 >2 mm foi a composição mais densa e, conseqüentemente, a que apresentou maior resistência á compressão, isto pode ser resultado de um bom empacotamento estrutural da mistura, no entanto foram registadas algumas incoerências para esta composição, uma vez que em termos de trabalhabilidade, esta mistura revelou ser um betão bastante seco, onde era visível a predominância de grossos na mistura, com poucos finos, e com uma consistência medianamente fraca (tabela 4.16), no entanto aceitável. Relativamente às composições B1_C30 e B2_C30, apesar de apresentarem valores de f_{cm} entre a 20 e 25 MPa, respetivamente, estas composições foram desprezadas, uma vez que em termos de trabalhabilidade correspondem a betões pouco consistente (tabela 4.14 e 4.15), com registos de ocorrência de fenómenos de exsudação durante a realização dos ensaios de trabalhabilidade pelo cone *Abrams*, e que por conseguinte, a sua fraca trabalhabilidade iria comprometer as propriedades do betão no seu estado endurecido.

4.2.3.3.2. Resistência dos provetes de betão á penetração dos cloretos

Dada a importância da resistência da penetração dos cloretos (durabilidade) no betão, apresentou-se na tabela 4.18, para cada composição de betão, a profundidade média de penetração de cloretos, com a respetiva classe de trabalhabilidade. Contudo, a penetração dos cloretos no betão processa-se através da estrutura porosa da composição e, está diretamente ligada á rede contínua de poros capilares da composição de betão e das fendas e micro fendas existentes. Na tabela apresenta-se também os coeficientes de capilaridade respetivos. Existe uma relação direta entre estes valores e a penetração de cloretos. Neste contexto e, para uma análise mais completa, apresentou-se na figura 4.22 os respetivos valores de absorção por capilaridade, mais especificamente a quantidade de água absorvida pelas composições de betão ao fim dos tempos t_i iguais a 3, 6, 24 e 72 horas, obtida para cada composição de betão, de forma a se perceber se estes estão em concordância com os valores obtidos para a penetração de cloretos no betão.

Tabela 4.18 - Valores da profundidade média de penetração dos cloretos nas misturas de betão.

	Bref1_C0	B1_C15	B1_C30	Bref2_C0	B2_C5	B2_C10	B2_C10 >1mm	B2_C10 >2mm	B2_C15	B2_C30
Classe de trabalhabilidade	S3	S2	S1	S1	S2	S1	S1	S1	S2	S1
% Cinza de Fundo incorporada	0	15	30	0	5	10	10 >1mm	10 >2mm	15	30
Coefficiente de Capilaridade, C ($m^2/m^2 h^{1/2}$)	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$0,6 \times 10^{-3}$	$0,4 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$
Absorção de água por imersão (kg)	8,22	7,95	7,89	8,08	7,94	8,06	8,16	8,11	8	8,21
Profundidade média de penetração de cloretos (mm)	$\pm 33,5$	± 27	$\pm 24,7$	$\pm 18,5$	$\pm 19,4$	$\pm 19,1$	$\pm 25,5$	± 17	$\pm 19,3$	$\pm 26,7$

**Fig. 4.22** - Ensaio da Capilaridade, quantidade de água absorvida pelas composições de betão com h_i (horas).

[a] Composições de 1ª referência com 200 m³ de água; [b] Composições de 2ª referência com 180 m³ de água.

Tal como se verificou na tabela 4.18, a introdução da cinza de fundo nas composições de betão provocou uma melhoria na resistência á penetração dos cloretos apenas para as composições de 1ª referência, *B1_C15* e *B2_C30*, enquanto que para as composições de 2ª referência, apenas se verificou uma melhoria da durabilidade para a composição *B2_C10 >2mm*. Contudo, e apesar da adição de cinza de fundo nas restantes composições de betão não ter melhorado a durabilidade das mesmas, verificou-se que esta também não teve uma influência muito significativa no comportamento do betão, uma vez que os valores de profundidade média de penetração dos cloretos no betão não variam significativamente com adição de resíduo nas misturas. Relativamente as composição *B2_C10 >1mm* e *B2_C30*, estas foram as composição que apresentaram menor resistência á penetração de cloretos, comparativamente as restantes composições da mesma referência, já as formulações *Bref2_C0* e *B2_C10 >2mm* foram as que obtiveram os valores mais baixos de profundidade média de penetração de cloretos no betão, com valores de profundidade bastante semelhantes entre si, tal como se pode verificar na figura 4.22 e tabela 4.18. Na figura 4.23 apresenta-se a profundidade média de penetração dos cloretos dos provetes de betão, para as composições da 1ª referência, e nas figuras 4.24 e 4.25 apresenta-se a profundidade média de penetração dos cloretos nos provetes betão para as composições da 2ª referência.



Fig. 4.23 - Penetração dos cloretos nas composições 1ª referência de betão.

[a] Penetração dos cloretos na mistura *Bref1_C0*; [b] Penetração dos cloretos na mistura *B1_C15*; [c] Penetração dos cloretos na mistura *B1_C30*.

É evidente a semelhança nos valores de profundidade média de penetração dos cloretos nas composições *B1_C15* e *B1_C30* (figura 4.23), [b e c], comparativamente com a mistura padrão *Bref1_C0*, com uma profundidade de penetração visivelmente maior.

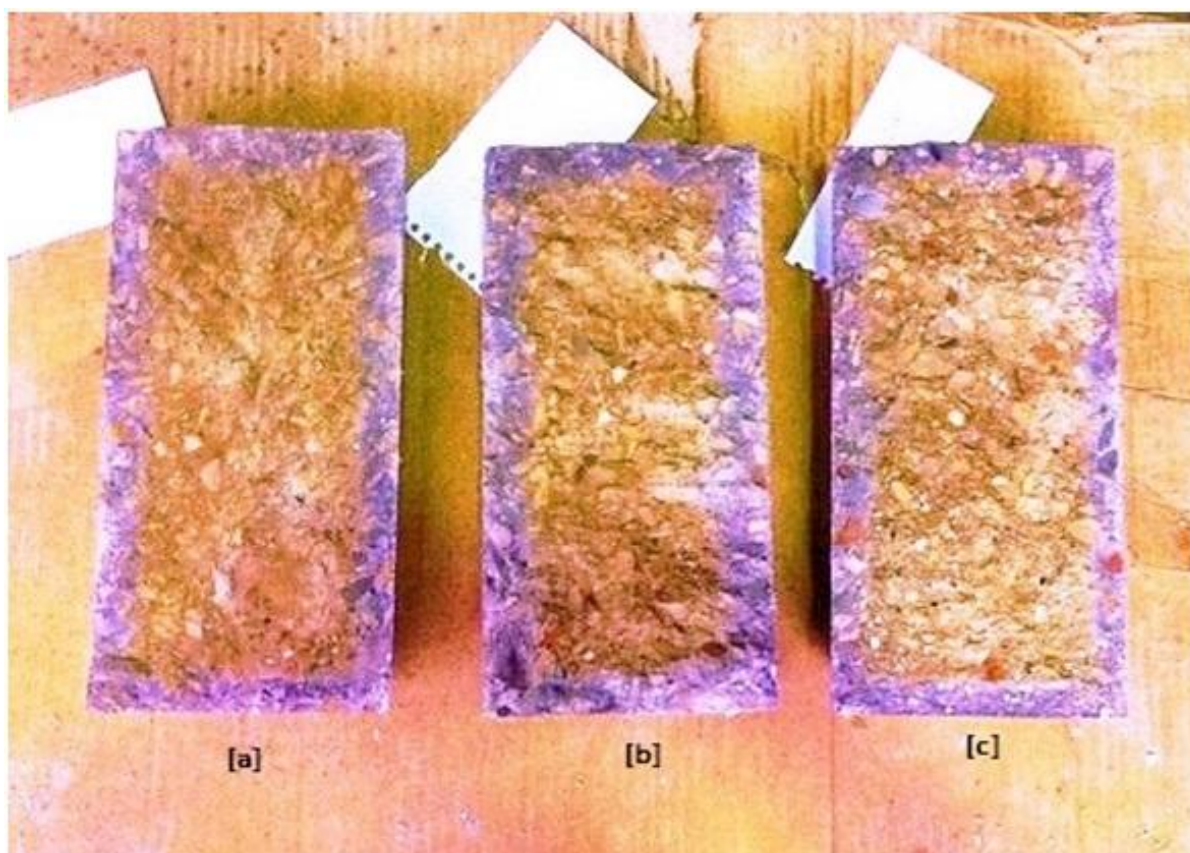


Fig. 4.24 - Penetração dos cloretos nas composições de betão de 2ª referência.

[a] Penetração dos cloretos na mistura *Bref2_C0*; [b] Penetração dos cloretos na mistura *B2_C10 >1mm*; [c] Penetração dos cloretos na mistura *B2_C10 >2mm*.

Por análise da figura 4.24 é visível a semelhança da profundidade de penetração dos cloretos nos provetes de betão das três composições. De seguida, apresenta-se na figura 4.24 a profundidade média de penetração dos cloretos para as composições *B2_C5*, *B2_C10* e *B2_C15*.



Fig. 4.25 - Penetração dos cloretos nas composições de betão de 2ª referência.

[d] Penetração dos cloretos na mistura *B2_C15*; [e] Penetração dos cloretos na mistura *B2_C5*; [f] Penetração dos cloretos na mistura *B2_C10*.

Pela análise da figura 4.25 é visível a semelhança da profundidade de penetração dos cloretos nos provetes de betão, e isto está diretamente relacionado com a densidade e porosidade das mesmas, tal como se pode verificar na tabela 4.17 e figura 4.22, em que ambas apresentaram valores de densidade e índice de absorção de água bastante similares e, portanto, faz todo sentido que não tenham ocorrido grandes oscilações nos valores de profundidade de penetração dos cloretos no betão.

Por outro lado, por análise da figura 4.22 verificou-se também que, as composições da 1ª referência com maior profundidade de penetração de cloretos correspondem a composições mais porosas e consequentemente absorvem maior quantidade de água por capilaridade, quando comparadas com as misturas da 2ª referência. A composição que absorveu menor quantidade de água por capilaridade foi a mistura *B2_C10 >2mm*, e que de certa forma está em concordância com o facto de

esta ter sido também a composição que apresentou maior resistência á penetração de cloretos no betão e a que apresentou maior resistência á compressão. Relativamente á mistura $B2_C10 >1\text{ mm}$ existem algumas incoerências nos resultados dos ensaios, uma vez que esta apresentou um elevado valor de profundidade de penetração de cloretos (tabela 4.18) e um índice muito baixo em termos de absorção de água por capilaridade (figura 4.22). O índice de absorção por capilaridade (IC) relaciona-se diretamente com a penetração dos cloretos no betão, ou seja, quanto mais baixo o IC, maior será a resistência á penetração dos cloretos, o que não se verifica para esta mistura. Este facto pode ser explicado, tendo em consideração os valores de resistência á compressão f_{cm} (registou-se o valor mais baixo), e a classe de trabalhabilidade para esta composição (tabela 4.17), igualmente baixa. Estes valores podem ter sido influenciados pela heterogeneidade da cinza de fundo incorporada, que potenciou uma má distribuição estrutural das partículas, permitindo a formação de muitos espaços vazios entre elas, facilitando assim a penetração de cloretos no betão e comprometendo a resistência da mesma. Relativamente á absorção por capilaridade esta foi menor devido á densidade da composição, que apesar de estar mal distribuída estruturalmente, não deixa de ser uma composição densa, talvez devido á predominância de grossos na mistura.

De uma forma geral, pode-se concluir que as composições de 2ª referência oferecem uma maior resistência á penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade no betão.

Por análise da tabela 4.18, verificou-se ainda que, os teores de absorção de água por imersão não oscilam muito entre eles, o que significa que a adição de cinza de fundo nas composições não teve um impacto muito significativo na durabilidade das composições de betão.

5. Conclusões

A elaboração deste trabalho permitiu concluir que a valorização dos resíduos gerados na produção da pasta e do papel são um tema cada vez mais estudado e mais relevante nos dias de hoje. A crescente procura de recursos naturais na construção civil tem vindo a crescer exponencialmente o que salienta mais a necessidade de valorização destes resíduos, minimizando-se assim o impacto que estes provocam no meio ambiente.

O recurso a aterros é uma solução mais fácil e mais barata a curto prazo de eliminação destes resíduos, no entanto, esta não é a solução mais eficaz e traz associados graves problemas ambientais e económicos. Hoje em dia, com o desenvolvimento das novas tecnologias e aliada a uma legislação que implica a reciclagem dos produtos finais da indústria transformadora, torna-se possível a valorização de quase toda a quantidade de resíduos gerados de uma forma ecológica e sustentável.

Durante o desenvolvimento do estado de arte deste trabalho foi possível conhecer e estudar as várias soluções de valorização adotadas para os resíduos da indústria da celulose e, perceber quais as suas vantagens e desvantagens no uso e, até que ponto existe viabilidade técnica, económica e ambiental para prosseguir com a sua aplicação. A valorização de resíduos no setor da construção como alternativa das matérias convencionais permite reduzir significativamente a quantidade de resíduo que segue para aterro como destino final, permitindo uma economia de custos e economia na extração de recursos naturais.

Neste contexto foi também iniciada a organização de uma base de dados com o principal objetivo de sistematizar a informação recolhida de modo a facilitar a transferência de conhecimento para o setor empresarial (gerador ou recetor de resíduos) com o propósito de fazer chegar as soluções de valorização até ao mercado.

Complementarmente também se efetuou neste trabalho um **caso de estudo** de valorização de um dos resíduos da indústria da celulose (cinzas de fundo da queima de biomassa). Desenvolveu-se a valorização num betão da cinza de fundo na sua constituição, com o objetivo de compreender se poderia ser uma matéria-prima no setor da construção e, desta forma, evitar-se a exploração contínua de recursos naturais e a deposição de resíduos nos solos.

A escolha da cinza de fundo como material alternativo na produção de um betão foi fortemente influenciada pelos fatores económicos e ambientais. Tal como referido anteriormente, segundo os valores estimados pelo boletim estatístico (BE) CELPA, (2012), são produzidos anualmente em

Portugal cerca de 2 488 mil Ton de pastas de fibra virgem e, para produzir cada tonelada de pasta fibra virgem são gerados 11,5 Kg de cinza de fundo, ou seja, por ano são gerados aproximadamente 28 620 Ton de cinza de fundo. Estes são valores bastantes elevados e vislumbra-se que a indústria da construção civil poderá ser um excelente meio de escoamento destes resíduos. Tendo em consideração os dados fornecidos pela Somague, (2010), o consumo de betão pronto em 2012 foi de cerca de 122.414,85 Ton. Utilizar este resíduo como matéria-prima no setor da construção civil não só escoaria, quase na totalidade, a quantidade de cinza de fundo gerada no processo de combustão da biomassa, como também evitaria a extração contínua das matérias-primas convencionais.

Após análise da distribuição granulométrica da cinza verificou-se que esta apresenta uma composição bastante variada, composta tanto por areias, como por fragmentos de pedras ou rochas, com diâmetros mais elevados, tratando-se portanto de um material heterogéneo. Desta forma foi possível incorpora-la na composição do betão, manipulando as dosagens dos restantes agregados, nomeadamente areia e britas, que por serem homogéneos foram facilmente trabalhados permitindo assim, a substituição parcial por este resíduo. Com a adição da cinza nas composições de betão verificou-se que, a resistência mecânica não ficou comprometida e, em alguns casos, ainda se obtiveram melhores valores comparativamente com a composição de referência. Pelos ensaios realizados nos provetes de betão endurecido foi possível perceber que, este facto pode estar aliado ao bom comportamento estrutural do betão, ou seja, a heterogeneidade da cinza de fundo potenciou o bom empacotamento estrutural das partículas tornando a composição mais densa, sem grandes espaços vazios entre as partículas conferindo á composição uma maior resistência.

Em termos de trabalhabilidade, verificou-se que as composições contendo até 15 % de cinzas (*B2_C5*, *B2_C10* e *B2_C15*) foram as que obtiveram melhores resultados com uma classe de trabalhabilidade de S2. Relativamente às composições *Bref1_C0* e *Bref2_C0*, de referência, importa referir que houve uma perda de trabalhabilidade com a diminuição da dosagem de água, mas esta foi compensada com a incorporação de cinza de fundo com um agente super plastificante na mistura, obtendo-se assim uma melhor trabalhabilidade nas formulações de 2ª referência.

Apesar de a mistura *B2_C10* >2mm não ter apresentado uma classe de trabalhabilidade muito elevada, considerou-se que esta, de entre as dez formulações desenvolvidas, foi a que comprovou ser a melhor composição de betão, com o melhor valor de resistência mecânica, maior densidade e que por conseguinte absorveu menor quantidade de água durante a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade e aliado a este facto foi a que ofereceu maior resistência á

penetração dos cloretos no betão. Esta seria uma boa composição para se adotar na produção de um betão convencional, que pretende substituir parcialmente a cinza de fundo apenas pela fração mais grossa, as britas. Neste caso, os maiores beneficiários seriam as indústrias que as geram pois poderiam vender a cinza de fundo como uma matéria-prima para o setor da construção, em vez de pagar para a colocar em aterro, e as indústrias de produção de betão, que poderiam adquirir a cinza de fundo a um preço muito mais baixo do que o preço de aquisição de outras matérias-primas convencionais.

Outro ponto importante a salientar é que, atualmente as indústrias de produção de argamassas já começam adotar a cinza de fundo como um substituto parcial de algumas matérias-primas utilizadas na confeção das mesmas, isto por se tratar de um material consideravelmente mais barato e que mesmo assim confere boas características físicas e mecânicas às composições. O único inconveniente, e que de certa forma serviu de alavanca para a elaboração desta formulação, *Bref2_C10 >2mm*, é que na produção das argamassas apenas se aproveita a fração mais fina da cinza de fundo, até 2 mm, sendo portanto rejeitada a fração mais grossa deste resíduo, seguindo como destino final para aterro. A aplicação desta solução iria valorizar a fração mais grossa da cinza de fundo sobrando da produção de argamassas, na produção de um betão convencional.

Dentro deste contexto, aproveitou-se para salientar também as misturas *B2_C10* e *B2_C15*, cujos ensaios de realizados as mesmas revelaram que estas também seriam boas composições para a produção de um betão convencional. Uma vez que apresentaram bons valores em termos de trabalhabilidade, uma boa resistência mecânica com valores de modulo de elasticidade elástica bastante altos e, uma boa resistência á penetração dos cloretos no betão. Estas formulações são adequadas para a produção de um betão convencional que pretende substituir parcialmente a cinza de fundo pela sua fração fina (areia) e fração grossa (as britas).

De uma forma geral, conclui-se que existe viabilidade na incorporação da cinza de fundo na produção de um betão convencional, substituindo-a parcialmente pelos seus agregados, de forma a valorizá-la como uma matéria-prima com elevado potencial na construção civil. A sua utilização como matéria-prima no setor da construção iria evitar que grande parte deste resíduo, cerca de 28620 Ton, fosse depositada em aterro. Este fato, aliado á economia de custos e economia na extração de recursos naturais, comprova que esta solução de valorização é viável, gerando economias em ambos os lados.

Em termos de trabalhos futuros nesta linha de investigação e desenvolvimento propõe-se:

- Seria interessante continuar a explorar e desenvolver a valorização destes resíduos noutras soluções de valorização com uma perspetiva concorrencial.
- Com base na literatura dever-se-ia continuar a estudar e perceber para cada resíduo quais as soluções de valorização mais viáveis tendo em consideração as vantagens económicas e ambientais recorrendo a metodologias que incorporassem a avaliação de ciclo de vida.

6. Referências Bibliográficas

Ahmadia B., Khajab W, (2001). "*Utilization of paper waste sludge in the building construction industry.*" Journal of Resources, Conservation and Recycling, 32(2), 105–113.

Atis CD, Karahan O, (2009). "*Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete.*" Construction and Building Materials, 23, 392 - 399.

Ahmaruzzaman M, (2010). "*A review on the utilization of fly ash.*" Progress in Energy and Combustion Science, 36(3), 327-363.

Barbosa R, Lapa N, Dias D, Mendes B, (2013). "*Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances.*" Construction and Building Materials, 48, 457 - 436.

Carvalho, (2006). "*Avaliação das propriedades mecânicas da argamassa contendo adição de resíduo de carbonato de cálcio gerado na fabricação de celulose.*" Mestrado em engenharia ambiental urbana, Universidade Federal da Bahia, Brasil, (tese).

Cristelo N, Soares E, Rosa I, Miranda T, Oliveira DV, Silva RA, Chaves A, (2013). "*Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications.*" Construction and Building Materials, 48, 925–93.

Coelho AM, (2010). "*Gestão de Cinzas produzidas em centrais de cogeração operadas com biomassa.*" Universidade de Aveiro, Mestrado Integrado de Engenharia de Ambiente e Ordenamento, (tese).

Cabrera M, Galvin AP, Agrela F, Carvajal MD, Ayuso J, (2014). "*Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures.*" Construction and Building Materials, 58, 234 - 244.

Cabral F, Ribeiro HM, Hilário L, Machado L, Vasconcelos E, (2008). "*Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials.*" Bioresource Technology, 99, 8294 - 8298.

CELPA, (2012a). "*Boletim Estatístico 2012 - Indústria Papeleira Portuguesa*." Disponível em: <<http://www.celpa.pt/Default.aspx?PageId=207&ContentId=87&ChannelId=112>>, [Consult. 23/11/2014].

CELPA, (2012b). "*CELPA - Associação da Indústria Papeleira*." Disponível em: <<http://www.celpa.pt/>>, [Consult. 23/11/2014].

CNSFARNELL, (2004). "*Ultrasonic Pulse Velocity Testing - Technical Reference Manual*": CNS Farnell Limited.

Coutinho AS, (1988). "*Fabrico e propriedades do betão*." Vol II, LNEC, Lisboa.

Dias V, (2012). "*Aplicação de Resíduos Sólidos em Pavimentos Rodoviários* " Universidade de Aveiro, Mestrado integrado de Engenharia Civil, (tese).

Demir I, Baspınara MS, Orhan M, (2005). "*Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production*." Building and Environment, 40, 1533 - 1537.

Dias, (2012). "*Estudo da Valorização de Cinzas de Biomassa na Produção de Materiais para a Construção de Recifes Artificiais*." Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energia e Bioenergia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, (tese).

Garcia ML, Coutinho JS, (2013). "*Strength and durability of cement with forest waste bottom ash*. Construction and Building." Materials, 41, 897–91.

http://www.somague.pt/site/material_de_apoio/somague_relatorios/rc_sgps_pt_2012/files/assets/basic-html/page87.html, [Consult. 17/11/2014].

<http://www.celpa.pt/> - Boletim estatístico 2013. [Consult. 23/11/2014].

Jackson MN, Schultz S, Sander P, Schopp L, (2009). "*Beneficial use of CFB ash in pavement construction applications*" Fuel, 88, 1210 - 1215.

Lima E, (2010). "*Utilização de resíduo Grits da Fabricação da celulose pelo processo Kraft como agregado graúdo para concreto.*" Mestrado em Engenharia Industrial, (tese).

Modolo R., (2006). "*Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil.*" Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos, Universidade de Aveiro, (tese).

Modolo R, Benta A., Ferreira VM, Machado LM, (2010). "*Pulp and paper plants wastes valorization in bituminous mixes.*" Waste Management, 30(4), 685-696.

Modolo R, Senff L, Ferreira VM, Labrincha JA, Tarelho LA, (2011). "*Lime-mud from pulp and paper mills effects in cement based materials.*" Department of Civil Engineering/CICECO, Department of Ceramics and Glass Engineering/CICECO, Department of Environment and Arrangement, University of Aveiro (UA), Aveiro, Portugal.

Modolo R, Ferreira VM, Machado LM, Rodrigues M, Coelho I, (2011). "*Construction materials as a waste management solution for cellulose sludge.*" Waste management, 31, 370-377.

Modolo R, Senff L, Ferreira VM, Labrincha JA, Tarelho LA, (2011). "*Use of lime-mud from pulp mill plant in cement-mortars.*" Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities.

Modolo R, Dias VD, Ferreira VM, Tarelho LA, Labrincha JA, (2012). "*Waste management solutions in construction materials for bottom ash from biomass combustion.*" Cincos`12. Dpt. Civil Engineering/CICECO, Dpt. of Environment and Planning/CESAM, 3Dpt. Materials and Ceramics Engineering/CICECO, University of Aveiro, Aveiro, Portugal.

Modolo, RCE, Ferreira VM, Labrincha JA, Tarelho LAC, Senff L, Costa N, (2013). "*Lime mud as raw material in lightweight aggregate production.*" WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, 2nd International Conference, September 11th – 13th.

Modolo RCE, Ferreira VM, Tarelho LA, Labrincha. JA, Silva DFR, (2013). "*Bottom ash from biomass combustion as aggregate for mortars*" Dpt. Civil Engineering/CICECO, Dpt. Ceramics and Glass Engineering/CICECO, University of Aveiro , Aveiro, Portugal.

Modolo RCE, Ferreira VM, Tarelho LA, Labrincha JA, Senff L, Silva L, (2013). "*Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion*" Construction and Building Materials 45, 275–281.

Modolo RCE, (2014). "*Valorização de resíduos sólidos da Indústria de Celulose e Papel.*" Doutorado em Ciências e Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Portugal, (tese).

Mohammed BS, Fang OC, Hossain KM. Anwar, Lachemi M, (2012). "*Mix proportioning of concrete containing paper mill residuals using response surface methodology.*" Construction and Building Materials, 35, 63–86.

Mohammed SB, Fang OC, (2011). "*Mechanical and durability properties of concretes containing paper-mill residuals and fly ash.*" Journal of Construction and Building Materials, 25, 717 – 732.

Nassar RUD, Soroushian P, Ghebra T, (2013). "*Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete.*" Resources, Conservation and Recycling, 73, 78 - 85.

Oliveira V,. (2009) "*Valorização de Resíduos da Indústria da Pasta e Papel – Compostagem e Aplicação do composto no Solo.*" Mestrado em Engenharia do Ambiente Tecnologias Ambientais, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Algarve, Portugal, (tese).

Pinto, (2005). "*Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves.*" Mestrado integrado em Gestão Ambiental, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, Portugal, (tese).

Pels JR, Nie DS, Kiel JHA, (2005). "*Utilization of ashes from biomass combustion and gasification.*" Published at 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France, 17-21 October.

Pinheiro ML, Sant RCS, Alvarenga A, Ribeiro BC; Júnior PRS, Sarmet MS, Fassoni DP, (2013). "*Avaliação experimental de blocos prensados de solo-cimento com adição de grits.*" Ambient. construção, Porto Alegre, Brasil, 13, 2.

Paulo P, (2014). "*Valorização de Resíduos em Materiais de Construção.*" Mestrado integrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal, (tese).

Karahan O, Atis DC, (2011). "*The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete.*" *Materials and Design*, 32, 1044–1094.

Rajamma R, Ball RJ, Tarelho LAC, Allen GC, Labrincha JÁ, Ferreira VM, (2009). "*Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials.*" *Hazardous Materials*, 172, 1049 - 1960.

Silva C, (2009). "*Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas.*" Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil, (tese).

Shakir AA, Naganathan S, Mustapha KN, (2013). "*Properties of bricks made using fly ash, quarry dust and billet scale.*" *Construction and Building Materials*, 41, 131 - 138.

Siqueira FB, Holanda JNF, (2013). "*Reuse of grits waste for the production of soil–cement bricks.*" *Environmental Management*, 131, 1 - 6.

Simão, (2011). "*Valorização energética de lamas resultantes do processo de produção de pasta e papel numa caldeira de leito fluidizado.*" Mestrado em Energia e Bioenergia, Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, (tese).

Thompson G.; Swain J, Kay M, Forster C, (2001). "*The treatment of pulp and paper mill effluent: a review.*" *Bioresource Technology J.*, 77, 275-286.

Zhang L, (2013). "*Production of bricks from waste materials.*" *Construction and Building Materials*, 47, 643 – 65.